

## 海域実験にともなう フレキシブルライザー管の設計手法

安田 哲也<sup>\*1</sup> 工藤 君明<sup>\*1</sup> 岡本 恒雄<sup>\*2</sup>  
五嶋 泰洋<sup>\*2</sup>

当センターでは、山形県鶴岡市由良漁港沖に係留された浮体式海洋構造物を利用して、フレキシブルライザー管の海域実験を古河電気工業（株）及びロイヤルダッチシェル社と共同で実施している。

昭和63年7月～9月に第1期の海域実験を行い、平成元年度からロイヤルダッチシェル社も加えた国際共同研究として7月より第2期の海域実験を実施中である。第2期の海域実験では、第1期の実験での経験を生かしてフレキシブルライザーシステム敷設形状の再設計を行い、この設計にもとずいて7月に設置工事が行われた。

本稿では、第2期海域実験に使用したフレキシブルライザーシステムの設計条件、これにもとづく設計手法、シミュレーション解析の概要、7月の設置工事とこれにひきつづいて実施している海域実験の計測概要について報告する。

キーワード：フレキシブルライザー管、浮体式海洋構造物、海域実験、設計条件、シミュレーション

## Design Procedure of the Flexible Riser Corresponding to the Sea Test

Tetsuya YASUDA<sup>\*3</sup> Kimiaki KUDO<sup>\*3</sup>  
Tsuneo OKAMOTO<sup>\*4</sup> Yasuhiro GOTO<sup>\*4</sup>

JAMSTEC has been conducting a sea test of a flexible riser pipe utilizing a floating offshore structure, off Yura port in Tsuruoka city in cooperation with Furukawa Electric Co., Ltd. (FEC) and Royal Dutch Shell Co..

The first phase of the sea test was carried out from July to September, 1988. Second phase has been carried out since July 1988 as international joint research effo-

---

<sup>\*1</sup> 海洋開発研究部

<sup>\*2</sup> 古河電気工業(株)

<sup>\*3</sup> Marine Research and Development Department

<sup>\*4</sup> The Furukawa Electric Co., Ltd.

rt in cooperation with Royal Dutch Shell Co. and FEC.

Based on the experience in the first phase, the configuration of the flexivble riser system was redesigned prior to the second phase sea test and installed in July, 1989.

The design conditions of the flexible riser system used in the second phase sea test, design procerdure, results of theoretical simulation, sketch of the installation work on July and measurements performed in the sea test are reported in this paper.

**Key word:** flexible riser, floating offshore structure, sea test, design condition, simulation.

## 1 はじめに

ライザー管は高温高圧のオイルを海底から海上まで揚げるためのもので、従来は鋼管製であったが、近年海底石油開発が沖合大水深海域に移行するにつれ、浮体式石油生産設備の動きに追従できるフレキシブルなものが開発されてきた。

当センターでは、山形県鶴岡市由良漁港沖に係留された浮体式海洋構造物を利用して、昭和63年よりフレキシブルライザー管の海域実験を古河電気工業(株)及びロイヤルダッチシェル社と共同で実施している(図1)。

昭和63年7月～9月に第1期の海域実験を行い、また平成元年度はロイヤルダッチシェル社も加えた国際共同研究としてライザーシステムを再設計し、7月に設置工事を行って第2期の海域実験を実施中である。

本稿では第2期の海域実験に使用したフレキシブルライザーシステムの設計条件と、これにもとづく設計手法、シミュレーション解析の概要、7月に行ったライザーシステムの敷設工事とこれにひきつづいて実施している海域実験での計測概要について報告する。

## 2 フレキシブルライザーシステム

フレキシブルライザー管の研究開発はこれまで主に外国で進められ、使用実績もある。わが国では石油公団を中心に研究開発が進められている。ただ実機による海域実験の例は世界でも極めて少なく、今回の実験はわが国では初めての試みとなっている。

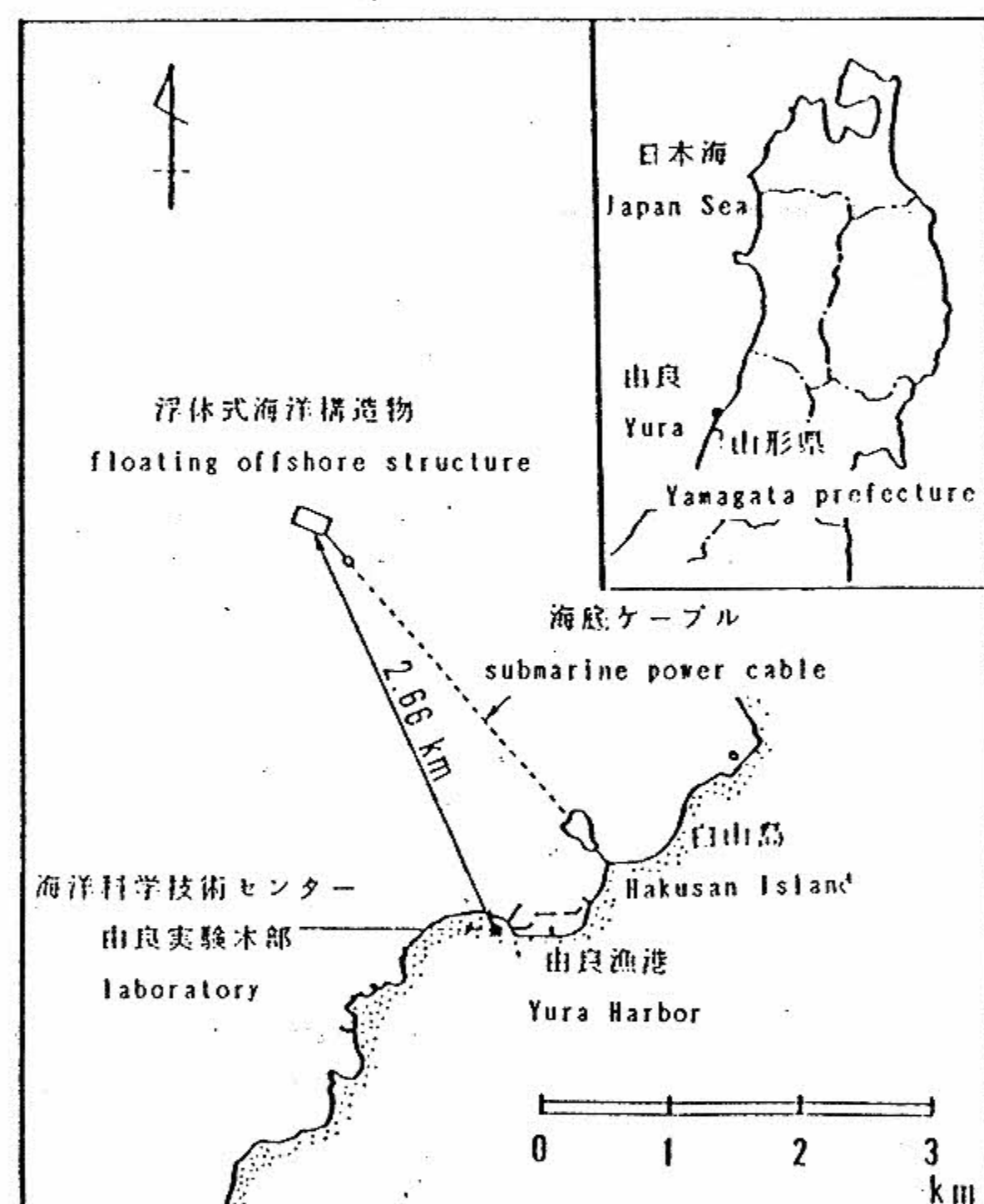


図1 フレキシブルライザー管の設置海域  
Fig.1 Installation site of the flexible riser

今回の海域実験に使用しているフレキシブルライザー管は、インターロック管、内部パイプ、内圧補強層、軸力補強層及び外部シースから構成され、全長140m、内/外径 76.2mm/134mm、設計内圧 5000psi のものである。

フレキシブルライザー管の海中敷設形状にはいくつかのタイプがあり、使用条件に合った形状を選ぶ必要がある(表1)。本海域実験では、浅水深においても浮体の移動、動揺をライザー管の変

形により吸収しやすく、また設置が容易なことから、分散ブイ型 (Lazy Wave) を選定した。

ライザー管の上端部には、曲げによる応力集中を防止するためのベンドスティフナーを取付け、又ライザー管の端部には端末金具を取り付けた。端末金具はパイプの内圧や軸力に対する終端としての機能及び他装置との接続機能を有する。ライザー管の中間部には浮力を与えるための分散ブイを取り付けている (図2)。

海底側端末はロープにて海底側シンカーに接続し、端末の手前にライザー管固定用のアンカーデバイスを取り付けている。

### 3 設計条件の検討

フレキシブルライザー管の敷設形状を設計する場合、ライザー管上端部と接続している浮体の移

動量、動揺を知ることが重要となる。そこで設計に入る前に浮体の動きについて調査を実施した。

#### 3.1 浮体式海洋構造物の水平移動量

浮体式海洋構造物は 6 本の係留ラインにより弛緩係留されており、波、風、潮流を受けた場合に位置が移動する。この移動の特性と移動の大きさを調べるため、光波測距儀による計測を行った。つまり、浮体上に反射体を取り付け、陸上の実験本部より光波測距儀にて視準して浮体までの水平距離とその方向を計測し、これにより浮体位置の変化を追跡した (図3)。水平距離の計測精度は、気温・気圧による気象補正によりミリ単位でえられる。一方、水平角は10秒ピッチの計測であり、陸から浮体までの距離が約 2.6km であることから、これによる位置の計測精度は約 0.1m 程度となる。

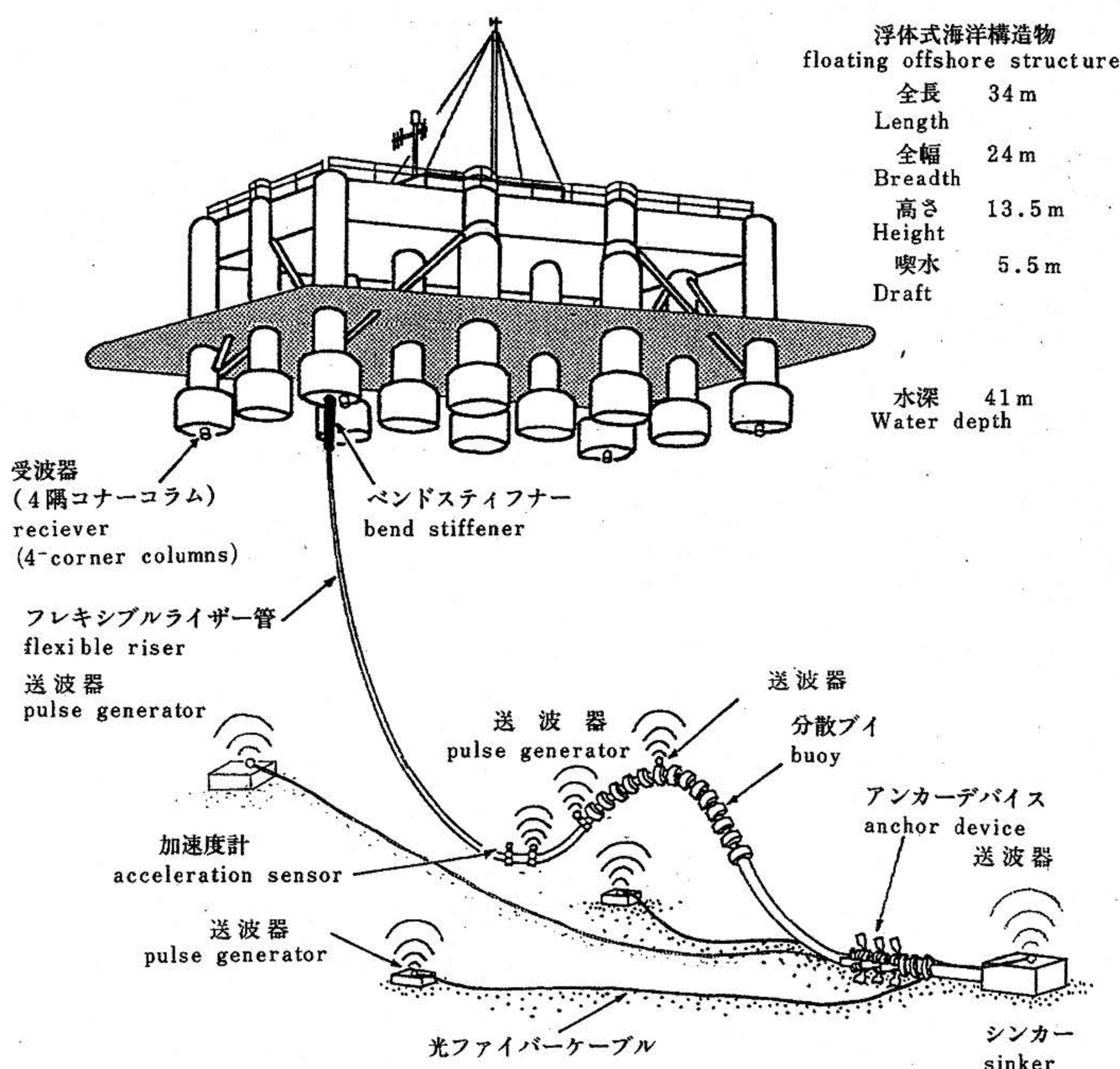
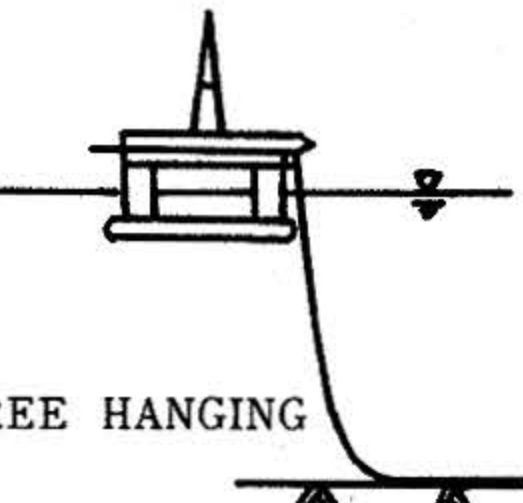
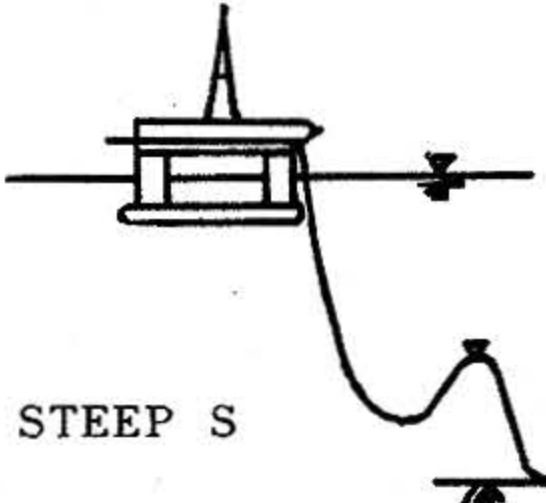
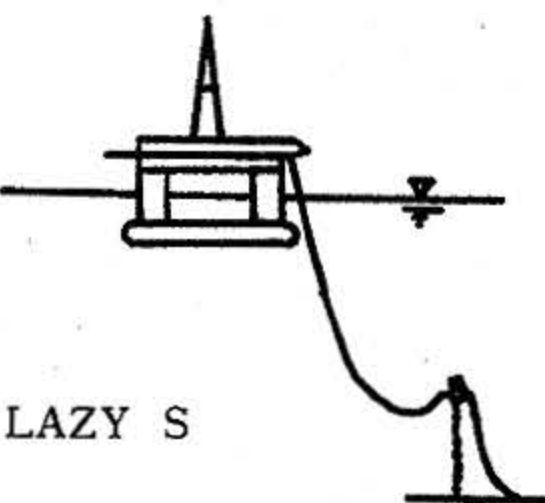
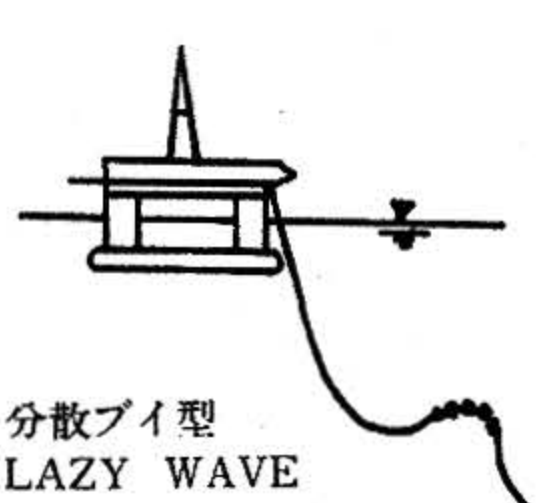


図2 フレキシブルライザー海域実験概要図

Fig. 2 Flexible riser test arrangement

表 1 フレキシブルライザー敷設管形状一覧  
Table 1 Configuration types of flexible riser

| 項目<br>Item                                                                                                                                                          | 敷設形状<br>Configurations                                                                                                               |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                      |  |  |  |  |
| 静的挙動<br>static movement                                                                                                                                             | 浅い水深<br>shallow water<br>深い水深<br>deep water                                                                                          | 制限される<br>restricted<br>良<br>good                                                   | 良<br>good<br>優<br>excellent                                                         | やや優<br>somewhat excellent<br>優<br>excellent                                         | 優<br>excellent<br>優<br>excellent                                                    |
| 動的挙動<br>dynamic movement                                                                                                                                            | 厳しい海象・浅海<br>rough sea, shallow<br>厳しい海象・深海<br>rough sea, deep<br>穏かな海象・浅海<br>moderate sea, shallow<br>穏かな海象・深海<br>moderate sea, deep | 悪い<br>bad<br>制限される<br>restricted<br>制限される<br>restricted<br>良<br>good               | 制限される<br>restricted<br>良<br>good<br>やや良<br>somewhat good<br>良<br>good               | 良<br>good<br>優<br>excellent<br>やや優<br>somewhat excellent<br>優<br>excellent          | やや良<br>somewhat good<br>やや優<br>somewhat excellent<br>良<br>good<br>優<br>excellent    |
| 敷設工事の容易さ<br>easiness of pipe lay work                                                                                                                               |                                                                                                                                      | 優<br>excellent                                                                     | 制限される<br>restricted                                                                 | 良<br>good                                                                           | 優<br>excellent                                                                      |
| 適用性 applicability<br>海底での整合性<br>fitness at the bottom<br>テンプレート方式の場合<br>template system<br>サテライト方式の場合<br>satellite system<br>多数ラインへの適用<br>application to many lines |                                                                                                                                      | 良<br>good<br>優<br>excellent<br>優<br>excellent                                      | 優<br>excellent<br>やや良<br>somewhat good<br>優<br>excellent                            | やや良<br>somewhat good<br>優<br>excellent<br>優<br>excellent                            | 良<br>good<br>優<br>excellent<br>制限される<br>restricted                                  |
| 経済性 economical extent<br>1ライン システム<br>1line system<br>多数ライン システム<br>many lines system                                                                               |                                                                                                                                      | 優<br>excellent<br>優<br>excellent                                                   | 制限される<br>restricted<br>やや良<br>somewhat good                                         | 良<br>good<br>やや優<br>somewhat excellent                                              | やや優<br>somewhat excellent<br>制限される<br>restricted                                    |

評価順位 : 優 やや優 良 やや良 制限される 悪い  
ranking of appraisal : excellent, somewhat excellent, good, somewhat good, restricted, bad

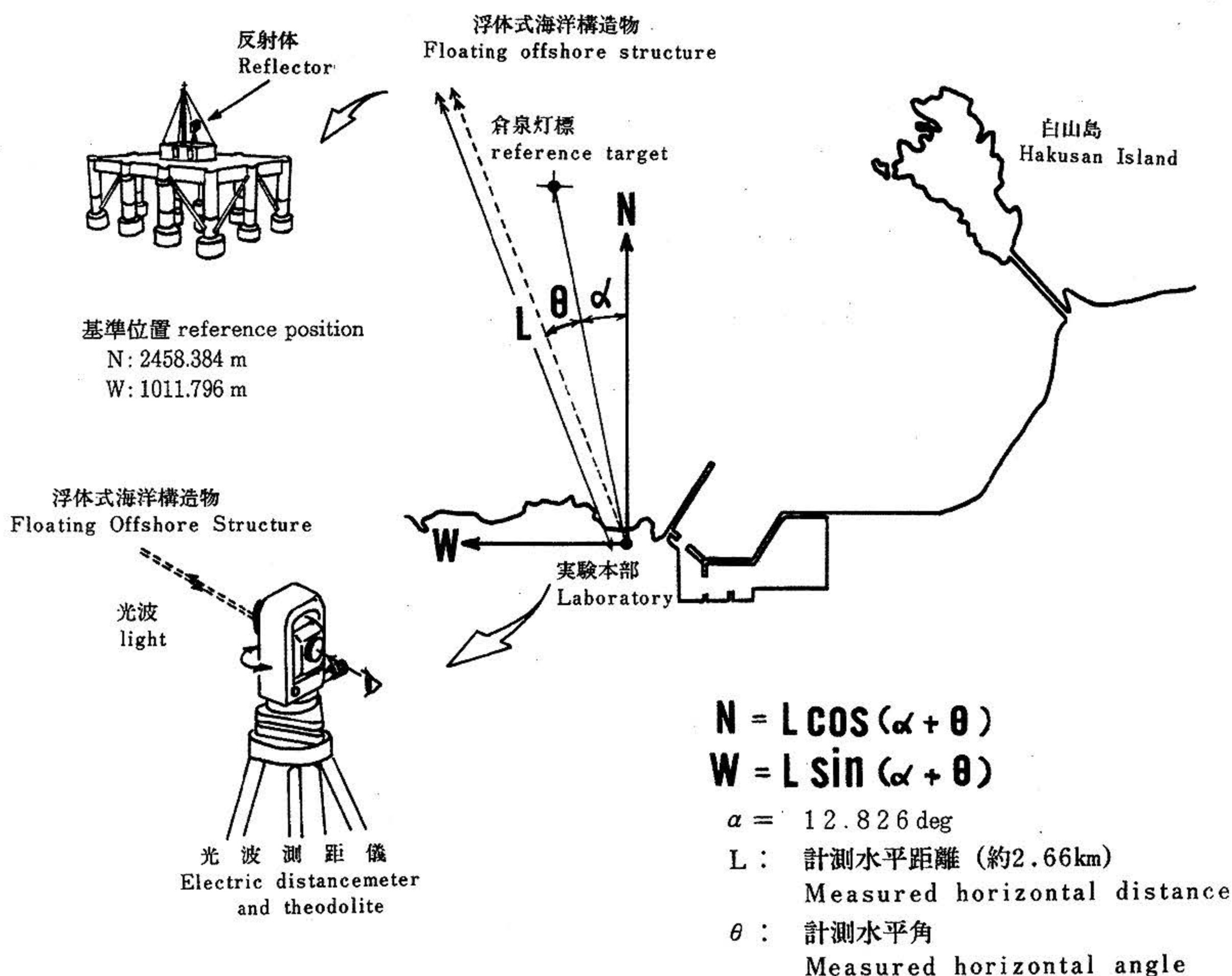


図 3 光波測距儀による浮体位置計測概要

Fig. 3 Measuring procedure of the floating offshore structure position using electric distancemeter and theodolite

3月27日より5月27日までの2ヶ月間計測を行った結果、下記が明かとなった(図4)。

(1) 海象・気象のおだやかな時期の浮体位置はほぼ一定の場所にある。これを基準位置(reference position)とした。

(2) 荒天に伴って浮体の位置は主に南西～北東の方向で移動し、基準位置を中心に見た場合、北東方向で最大15m程度、南西方向で5m程度の移動量を示す。

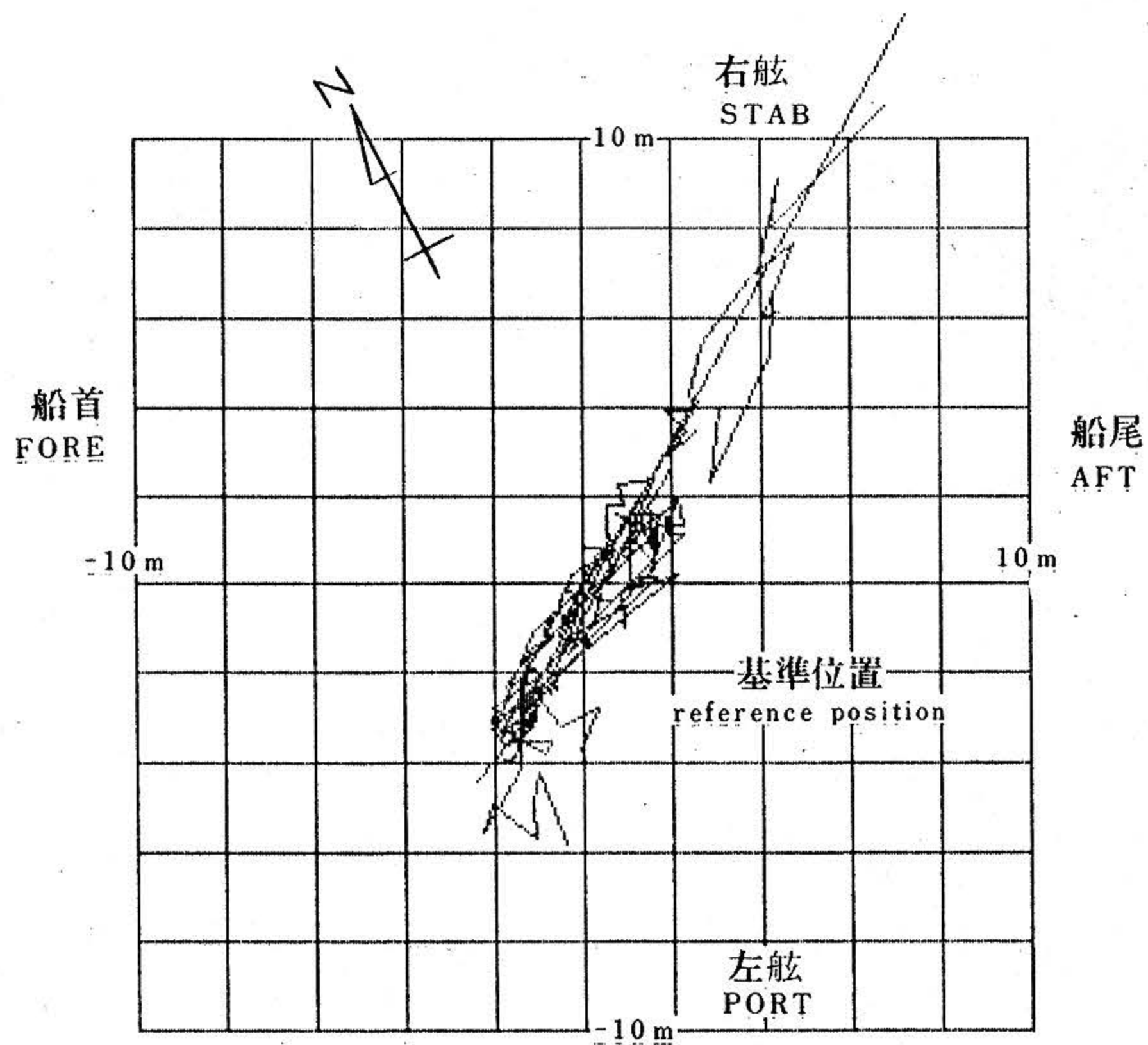
この時期の海象・気象は、4月1日～2日、4月17日～18日、4月25日～26日、5月14日～15日に荒天となり、有義波高が2mをこえた(図7, 図8)。この際の浮体位置の経時変化を図5, 図6に示す。荒天に伴って浮体位置が大きく移動したことがわかる。

由良沖の海域は対馬海流が南西から北東に向け

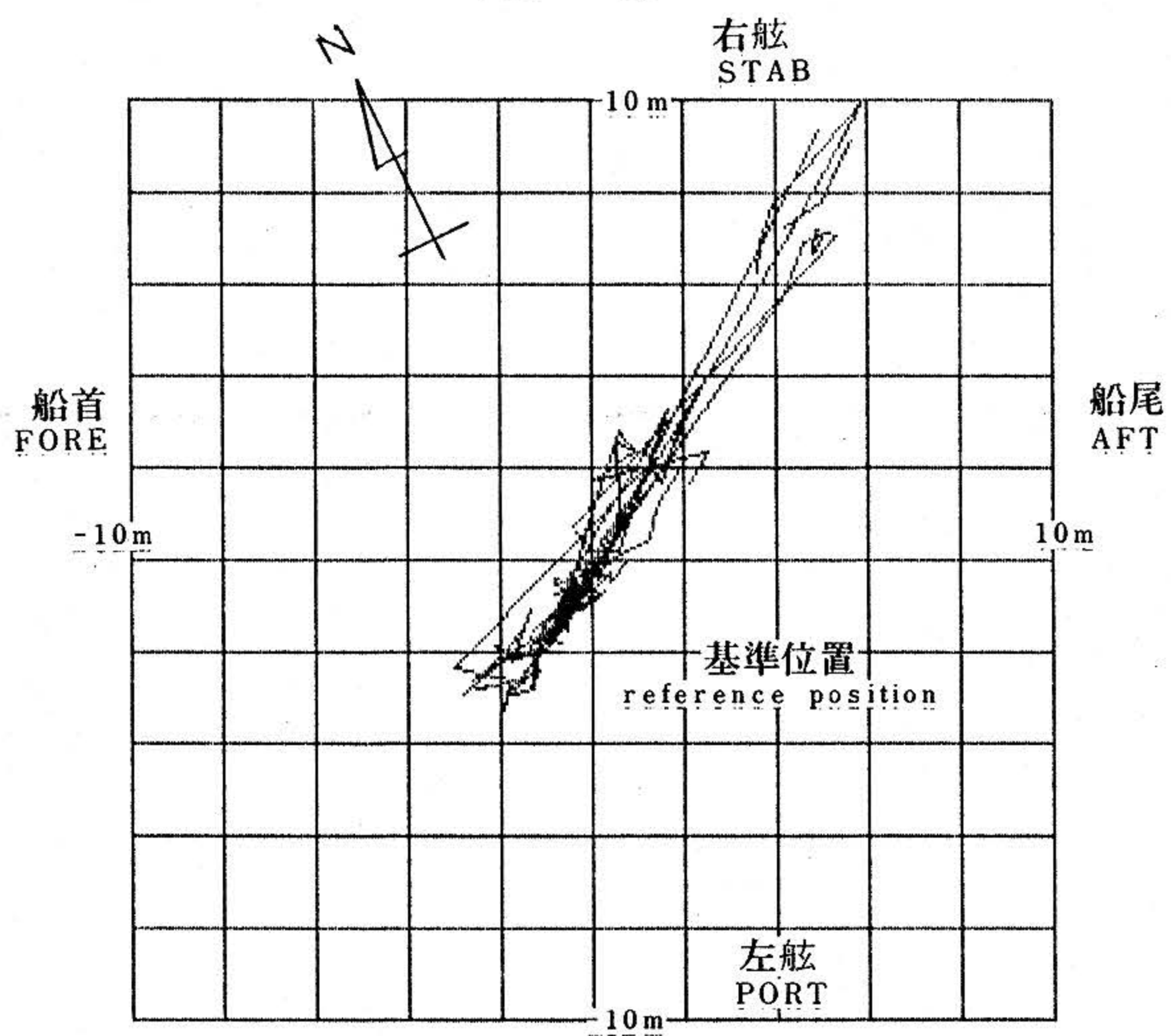
て流れており、4月25日～26日をのぞいてはほぼ海流の方向に浮体が移動したことになる。なお、計測した期間は春季に対応し、風や波の発達は南西から北東へ向けてが多いが、冬季の同海域は、北西からの強い季節風に伴って発達した波浪が北西方向(ほぼ浮体の船首方向)より押し寄せるため、浮体は南東方向に移動することが予想される。

### 3.2 浮体式海洋構造物の動的挙動

浮体式海洋構造物の波浪中での動的挙動を調べるため、浮体に加わる波強制力及び流体力係数を3次元特異点分布法により計算し、これを用いて波浪中動揺応答解析を実施した。ライザー管上端を接続したコラムの下端における応答を図9～11に示す。なお、弛緩係留状態での浮体動揺の固有周期は、前後揺で約130秒、左右揺で約140秒、上下揺で約9秒、縦揺で約14秒、横揺で約17秒、



3月27日~4月26日  
Mar. 27 ~ Apr. 26



4月30日~5月27日  
Apr. 30 ~ May 27

図 4 浮体位置の推移 (航跡図) 3月27日~5月27日  
Fig. 4 Positions of the floating offshore structure (tracking chart)  
Mar. 27 ~ May 27

浮体位置のスティックプロット  
 \*\*\*POSITION STICK PLOT\*\*\* (m)

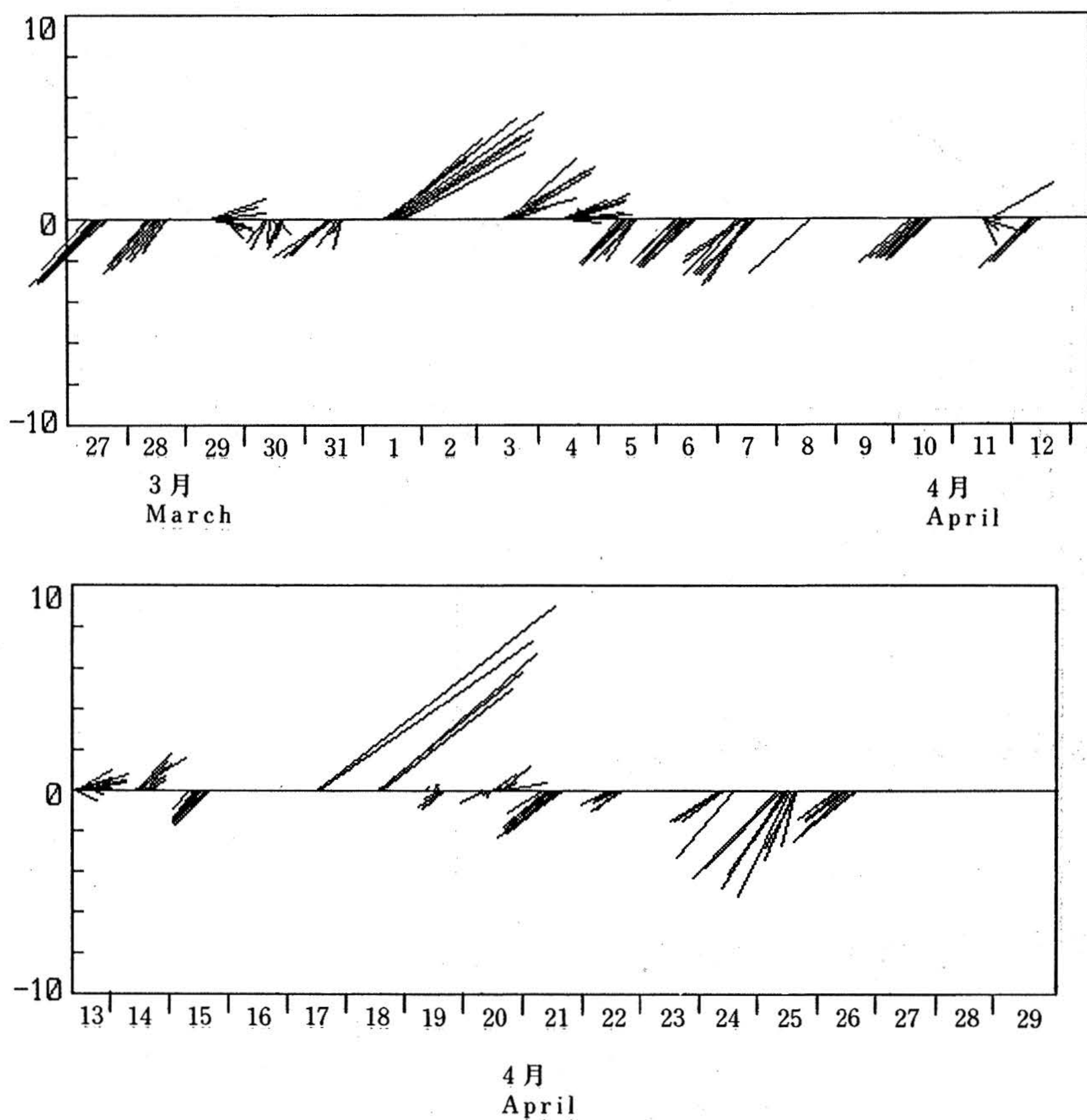


図 5 浮体位置の経時変化 3 月 27 日 ~ 4 月 26 日  
 Fig. 5 Positions of the floating offshore structure (Time history)  
 Mar. 27 ~ Apr. 26

浮体位置のスティックプロット  
 \*\*\*POSITION STICK PLOT\*\*\* (m)

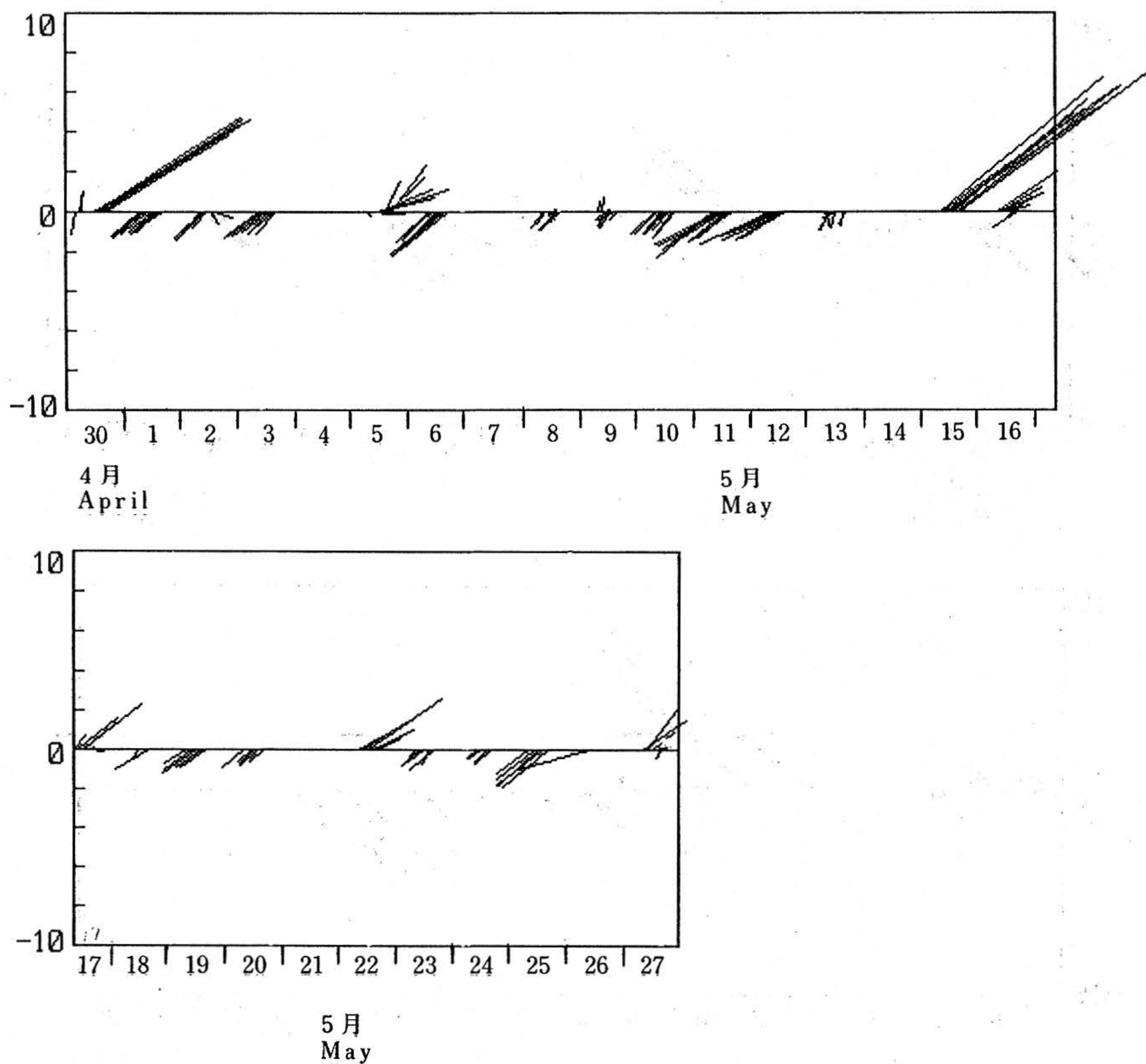


図 6 浮体位置の経時変化 4 月 30 日～5 月 27 日  
 Fig. 6 Positions of the floating offshore structure (Time history)  
 Apr. 30 ~ May 27

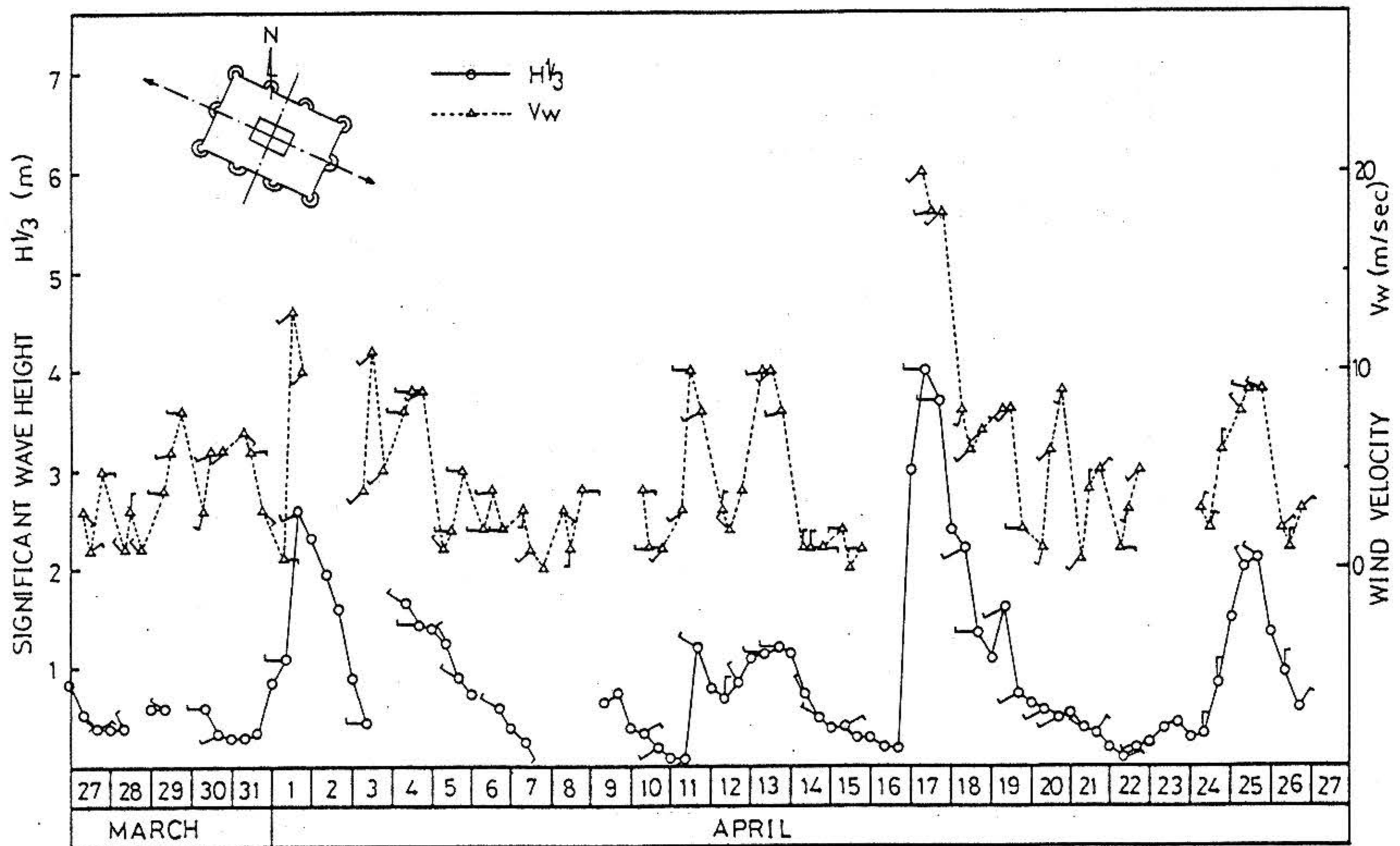


図 7 有義波高及び風速の日変化 (3月27日～4月27日)

Fig. 7 Daily alterations of significant wave height and wind velocity  
(Mar. 27 ~ Apr. 27)

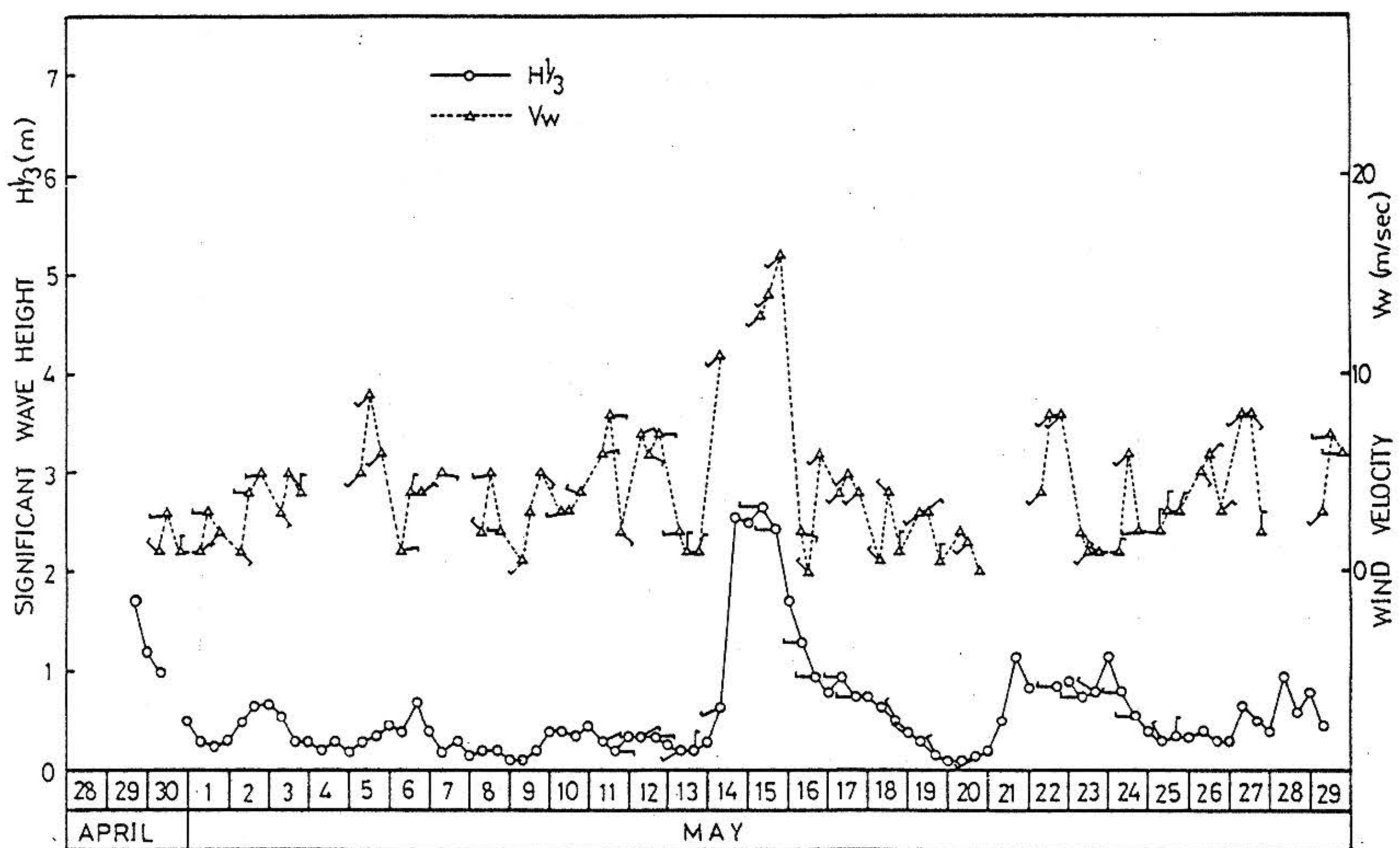


図 8 有義波高及び風速の日変化 (4月28日～5月29日)

Fig. 8 Daily alterations of significant wave height and wind velocity  
(Apr. 28 ~ May 29)

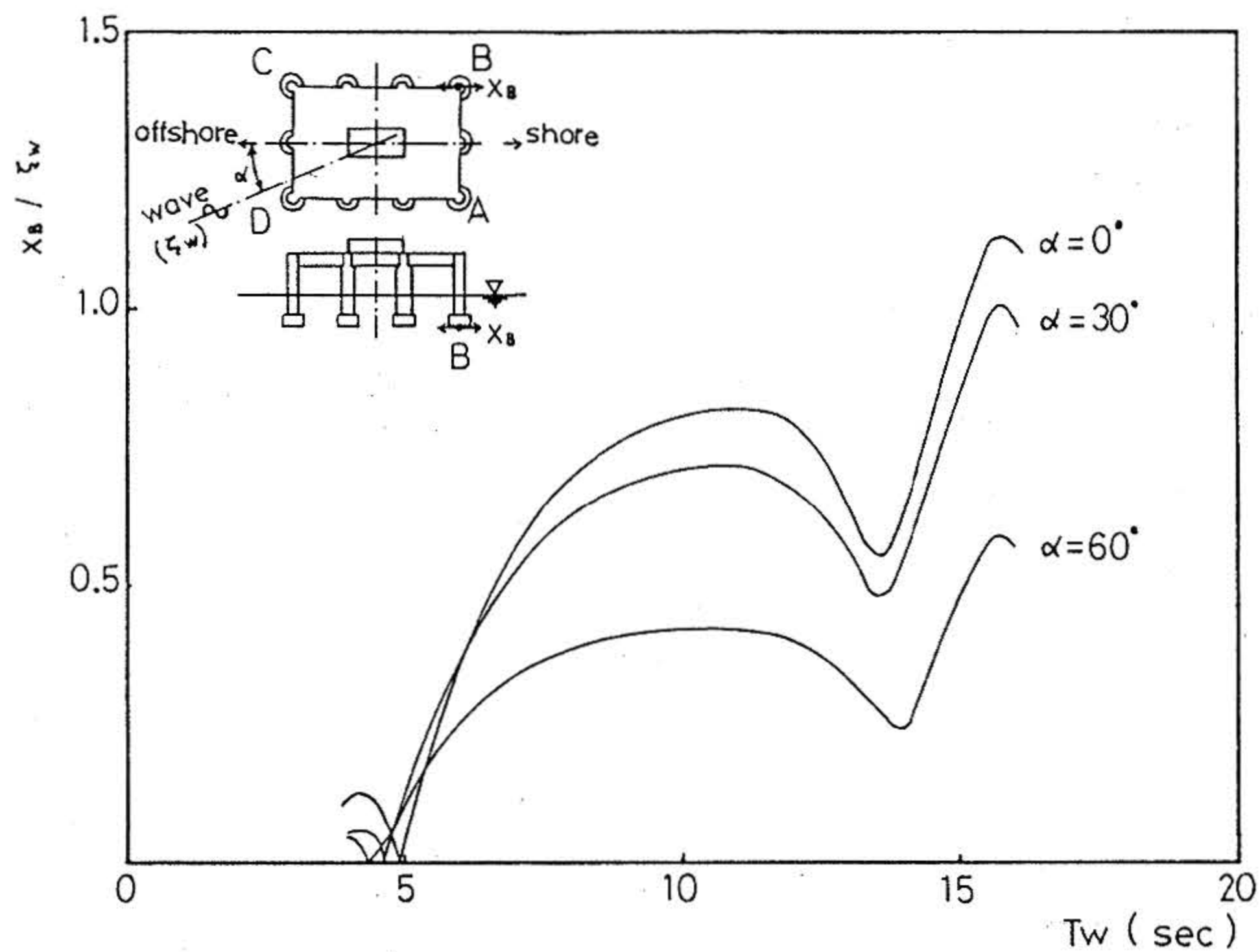


図 9 ライザー管上端接続部の波浪中動揺応答, 前後方向  
 Fig. 9 Dynamic motion response in waves at riser pipe top end, longitudinal direction

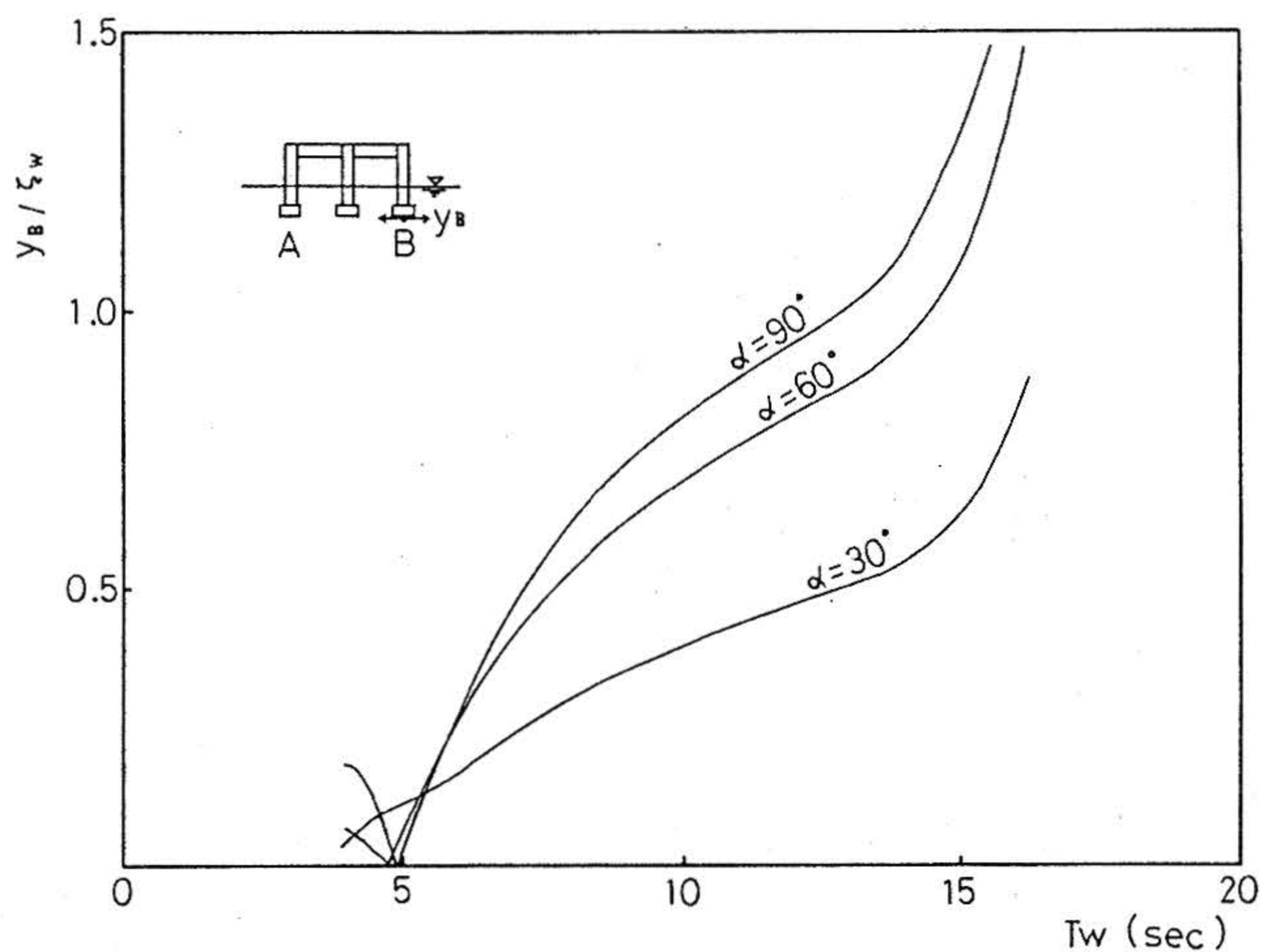


図 10 ライザー管上端接続部の波浪中動揺応答, 左右方向  
 Fig. 10 Dynamic motion response in waves at riser pipe top end, transverse direction

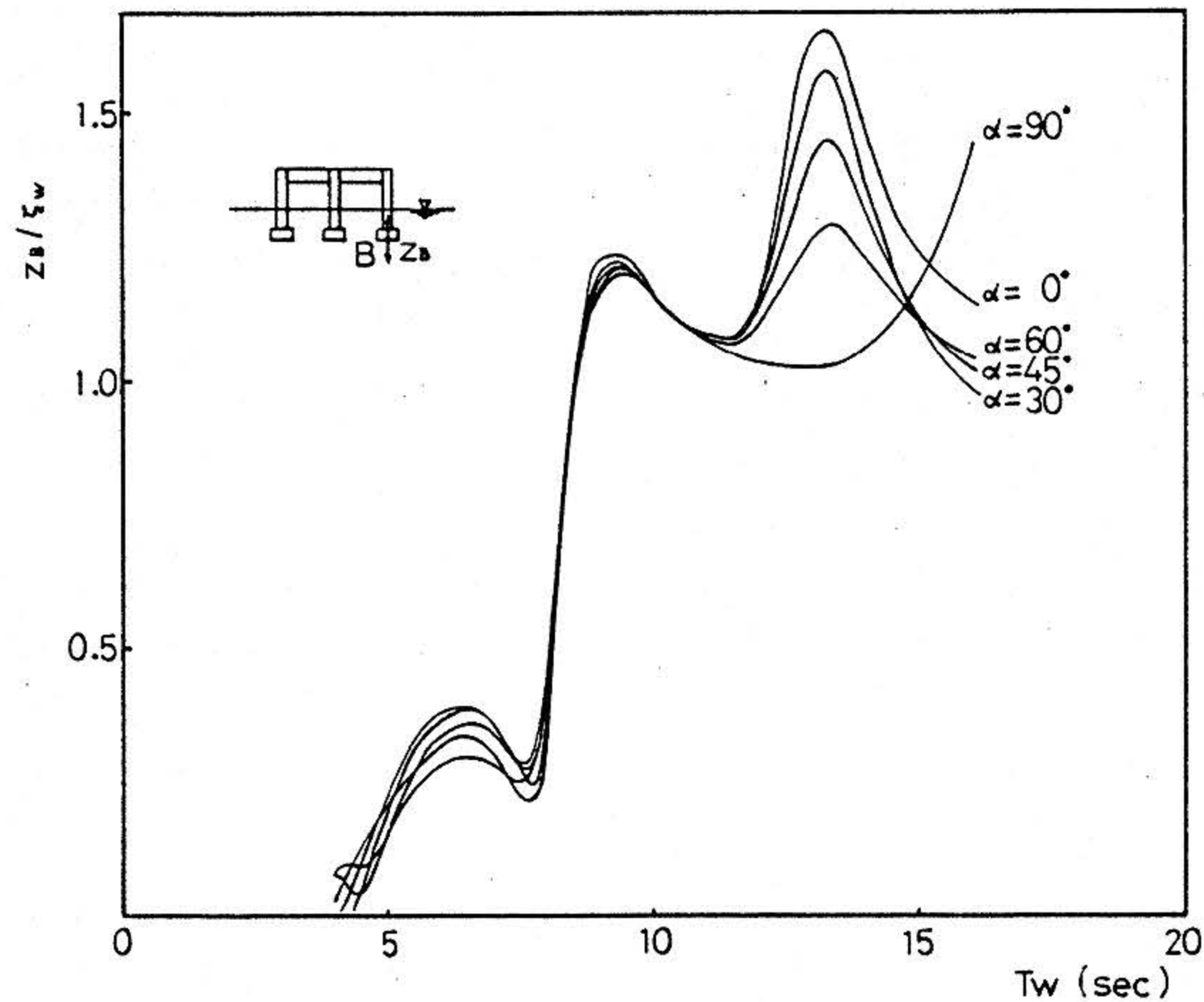


図 11 ライザー管上端接続部の波浪中動揺応答，上下方向

Fig. 11 Dynamic motion response in waves at riser pipe top end, vertical direction

表 2 フレキシブルライザーシステムの設計条件

Table 2 Design condition of the flexible riser system

|                                               |                                  |                   |
|-----------------------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| 水深<br>water depth                             | 41.0m                            |                   |
| 海象条件<br>sea condition                         | 最大波高<br>max. wave height         | 12.0m             |
|                                               | 波周期<br>wave period               | 11 sec            |
|                                               | 潮流<br>current                    | 1 knot            |
|                                               | 潮位<br>tide                       | $\pm 0.5\text{m}$ |
| 浮体移動<br>position change<br>of the<br>platform | 水平移動量<br>horizontal              | $\pm 10\text{ m}$ |
|                                               | 鉛直移動量<br>vertical                | $\pm 0.5\text{m}$ |
| 浮体動揺<br>dynamic motion<br>of the<br>platform  | 水平方向<br>horizontal               | $\pm 5\text{ m}$  |
|                                               | 鉛直方向<br>vertical                 | $\pm 7\text{ m}$  |
|                                               | 動揺周期<br>dynamic motion<br>period | 11 sec            |

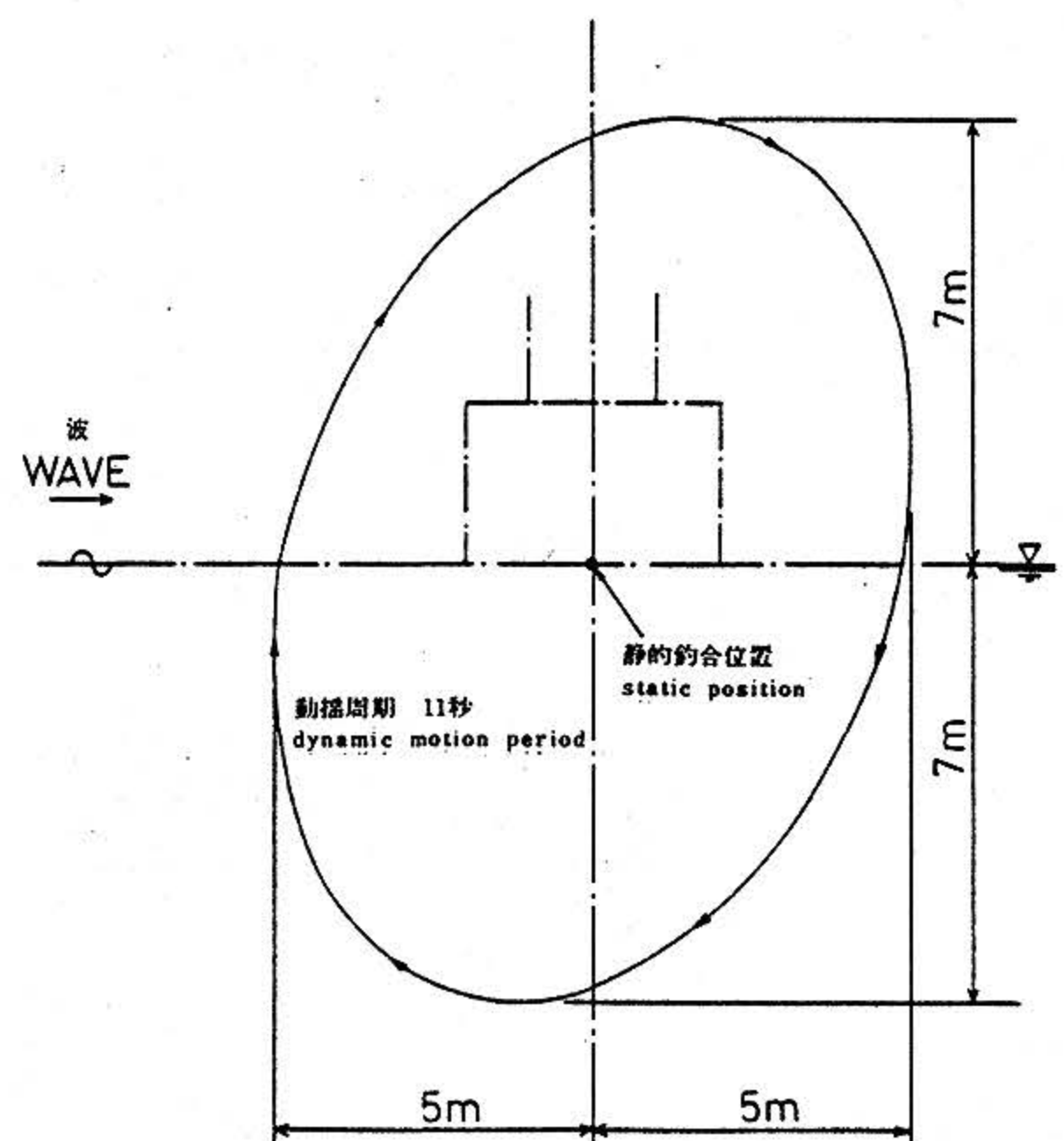


図 12 ライザー管上端接続部の挙動  
(ライザー管の動的挙動解析用に設定)

Fig. 12 Dynamic motion of the top end of the flexible riser pipe (assumed for dynamic response of the riserpipe)

船首揺で約70秒と推定している。

### 3.3 設計条件の設定

浮体式海洋構造物の設置されている由良海域の波浪については、その設計にあたって検討がなされており、設計最大波高12m、波周期10～11secとされている。

この波条件と前述3.1及び3.2に示した浮体の移動量、動揺応答特性を考慮して、フレキシブルライザーシステムの設計条件として表2に示す値を設定した。また浮体動揺に対応したライザー管取り付け部の動きについては図12のとおり仮定した。

## 4 フレキシブルライザーシステムの設計

本章では、海域実験に用いるフレキシブルライザーシステムの設計手順、設計手法、及びこれに対応したライザー管の挙動、内力（軸力、曲げモーメント）のシミュレーション解析の概要と結果について紹介する。

### 4.1 フレキシブルライザーシステムの設計手順

フレキシブルライザーシステムの設計手順を図13に示す。以下これを簡単に説明すると

(1) 設計条件として、設置海域の水深、潮流、浮体式海洋構造物の移動量、波浪中動揺、及び使

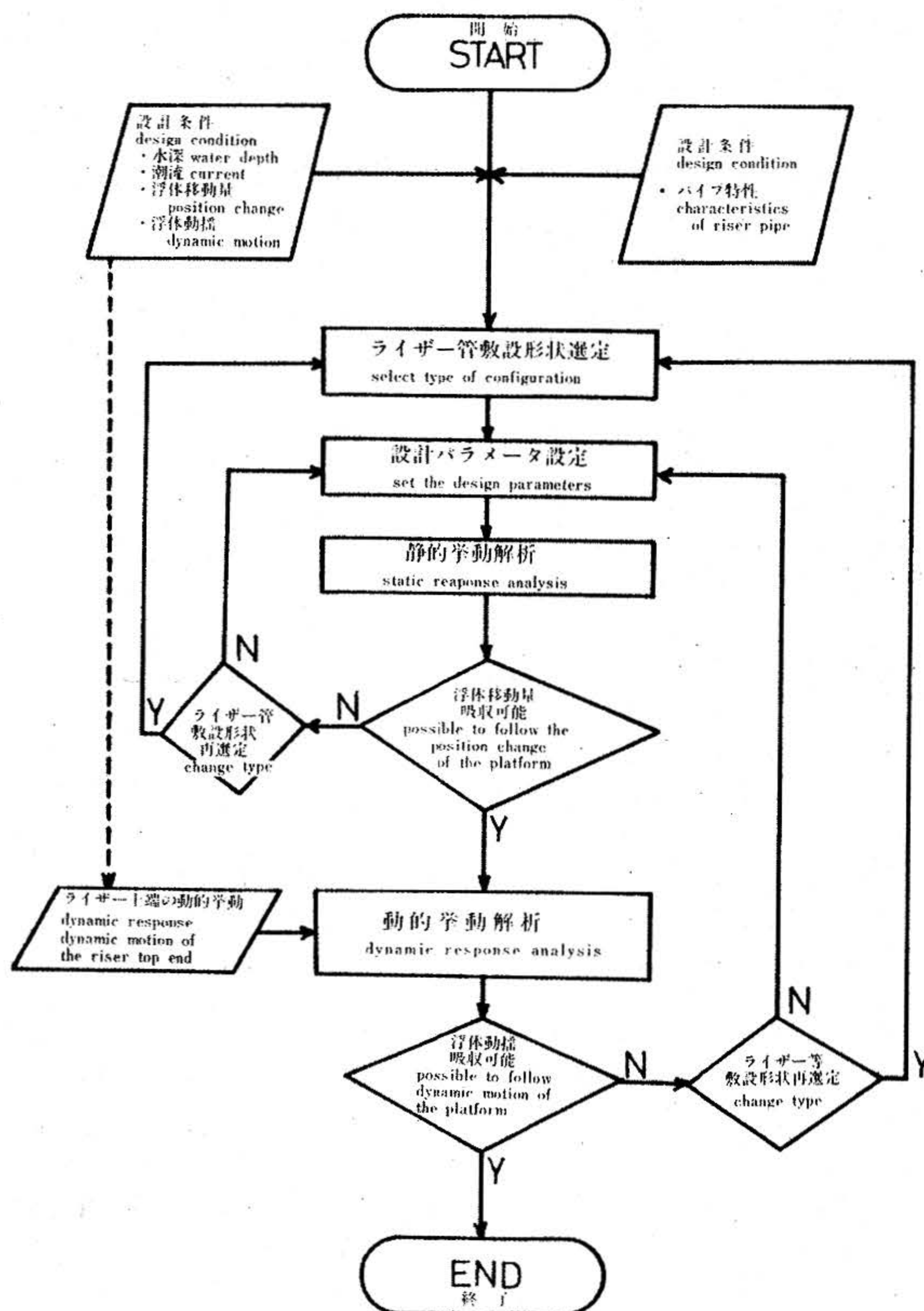


図13 フレキシブルライザー管敷設形状の設計フロー

Fig.13 Flow chart for the design of the flexible riser configuration

用するライザー管の重量，曲げ剛性を与え，これに適合するライザー管敷設形状について検討を行う（4.2 参照）。

（2）設定したライザー管敷設形状について静的挙動解析を実施し，浮体の移動量を静的に吸収可能かどうか検討する（4.3 参照）。

（3）浮体の移動量を吸収できない場合は，ライザー管敷設形状の再検討を行う。

（4）ライザー管上端部の浮体動揺を仮定して動的挙動解析を実施し，浮体の動揺が吸収可能かどうか検討する（4.4 参照）。

（5）浮体の動揺が吸収できない場合は，ライザー管敷設形状の再検討を行う。

### 4.2 ライザー管敷設形状の検討

ライザー管敷設形状の検討にあたっては，3章で示した設計条件にもとずいて，下記の条件に適合するよう各設計パラメーター（表3）の値を設定することが必要である。

（1）ライザー管に作用する荷重がその自重に比較して過大でなく，浮体の移動に対して極端な増加傾向でないこと。（もちろん荷重がその許容値をこえないこと。）

（2）パイプの全長にわたってその曲げ半径がパイプの最小曲げ半径より大きいこと。

（3）Lazy Wave の形状は下記の条件を満足すること。

- 1）たるみのある形状であること。
- 2）Lazy Wave形状の極大点の深度が許容レベルよりも浅くならないこと（海上船舶の航行の障害とならないこと）。
- 3）Lazy Wave 形状の極大点の深度が同形状の極小点の深度よりも深くならないこと。
- 4）Lazy Wave 形状の極小点が海底と接触しないこと。

そこで，まず第1期海域実験でのライザー管敷

表 3    ライザー管敷設形状の設計パラメーター  
Table 3   Design parameters of the flexible riser configuration

| 名 称<br>Name                   | 分 散 ブ イ 型<br>Lazy wave                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| システム図<br>System configuration |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 設計パラメータ<br>Design parameters  | <p>S1 : 上端より分散ブイまでのパイプ長<br/>pipe length from top end to the buoys</p> <p>S2 : 分散ブイの取付区間長<br/>length of the region where the buoys are attached</p> <p>W : パイプの単位長さ当りの水中重量<br/>unit weight of the riser pipe in sea water</p> <p>b : 分散ブイ取付区間の単位長さ当り浮力<br/>unit buoyancy of the region where the buoys are attached</p> <p>L : 上端より接地点までの水平距離<br/>horizontal distance from top end to touch down point</p> <p><math>\alpha</math> : 上端部パイプの支持角度<br/>angle of the riser pipe top end</p> |

設形状をベースに下記の設計パラメーターを設定し、これを中心に各パラメーターを変化させた場合のケーススタディーを実施した。

- ・ライザー管上端より分散ブイまでのパイプ長 (S1) - 40~60m
- ・分散ブイ取付区間長 (S2) - 20~40m
- ・分散ブイ取付区間の単位長さ当たりの浮力 (b) - 1.0~2.0 X w  
(w : パイプの単位長さ当たりの水中重量)

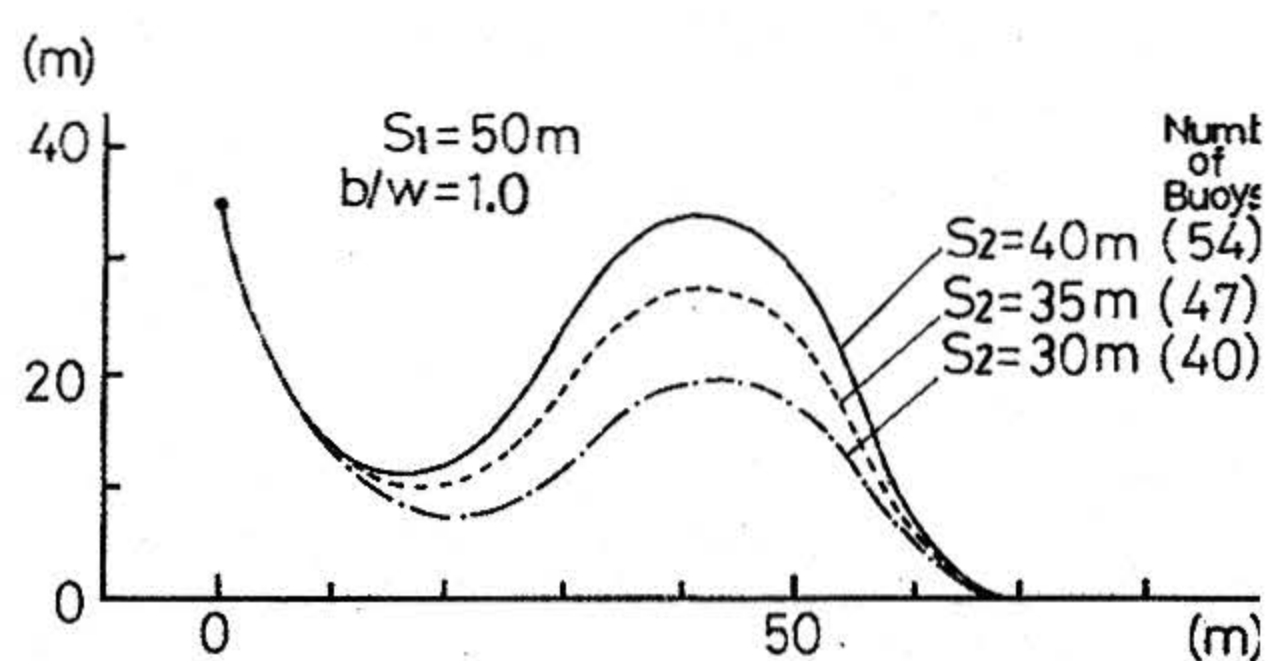
図14は、S1を変化させた場合のライザー管敷設形状の変化、S2を変化させた場合のライザー管敷設形状の変化をそれぞれ示す。この解析結果をもとに最適な設計パラメーターとして表4に示す値を設定した。

#### 4.3 浮体の移動に伴う静的挙動解析

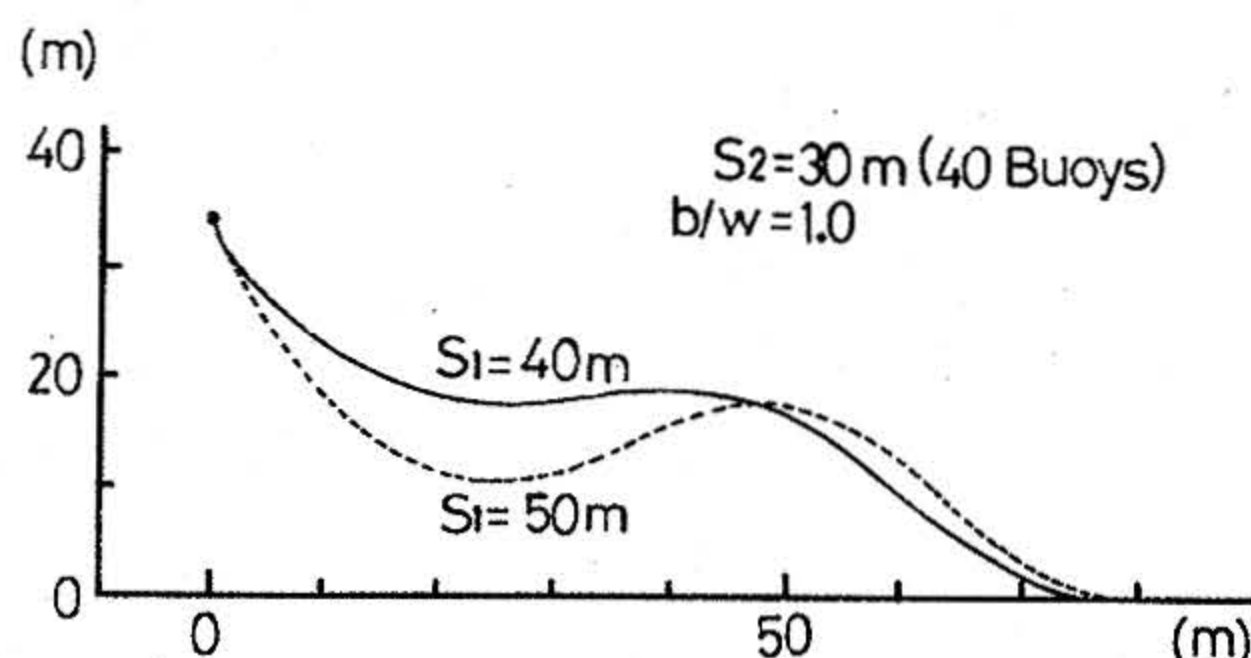
4.2 で設定したライザー管敷設形状について、浮体の最大移動量に対応した2次元静的挙動解析を実施した。解析結果のライザー管形状を図15に示す。また、ライザー管形状の各要点の位置及び作用荷重等を表5に示す。これら解析結果より、設定したライザー管敷設形状にて浮体の最大移動量を十分吸収可能であることが確認できた。

#### 4.4 浮体動揺に伴う動的挙動解析

浮体の動揺に伴う動的挙動解析を実施し、ライ



(1) S2を変化させた場合



(2) S1を変化させた場合

図14 ライザー管敷設形状のケーススタディー  
Fig. 14 Case study of the flexible riser configuration

表4 ライザー管敷設形状の設計パラメーター設定値

Table 4 Parameters of the designed flexible riser configuration

| 項目<br>Item                                                                  | 設定値<br>Designed value |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 上端より分散ブイまでのパイプ長<br>pipe length from top end to the buoys                    | 45m                   |
| 分散ブイの取付区間長<br>length of the region where buoys are attached                 | 35m                   |
| 分散ブイ取付区間の単位長さあたりの浮力<br>unit buoyancy of the region where buoys are attached | 36.76kg/m             |
| 上端より接地点までの水平距離<br>horizontal distance from top end to the touch down point  | 73.01m                |
| 上端部パイプの支持角度<br>angle of the pipe top end                                    | -90deg                |

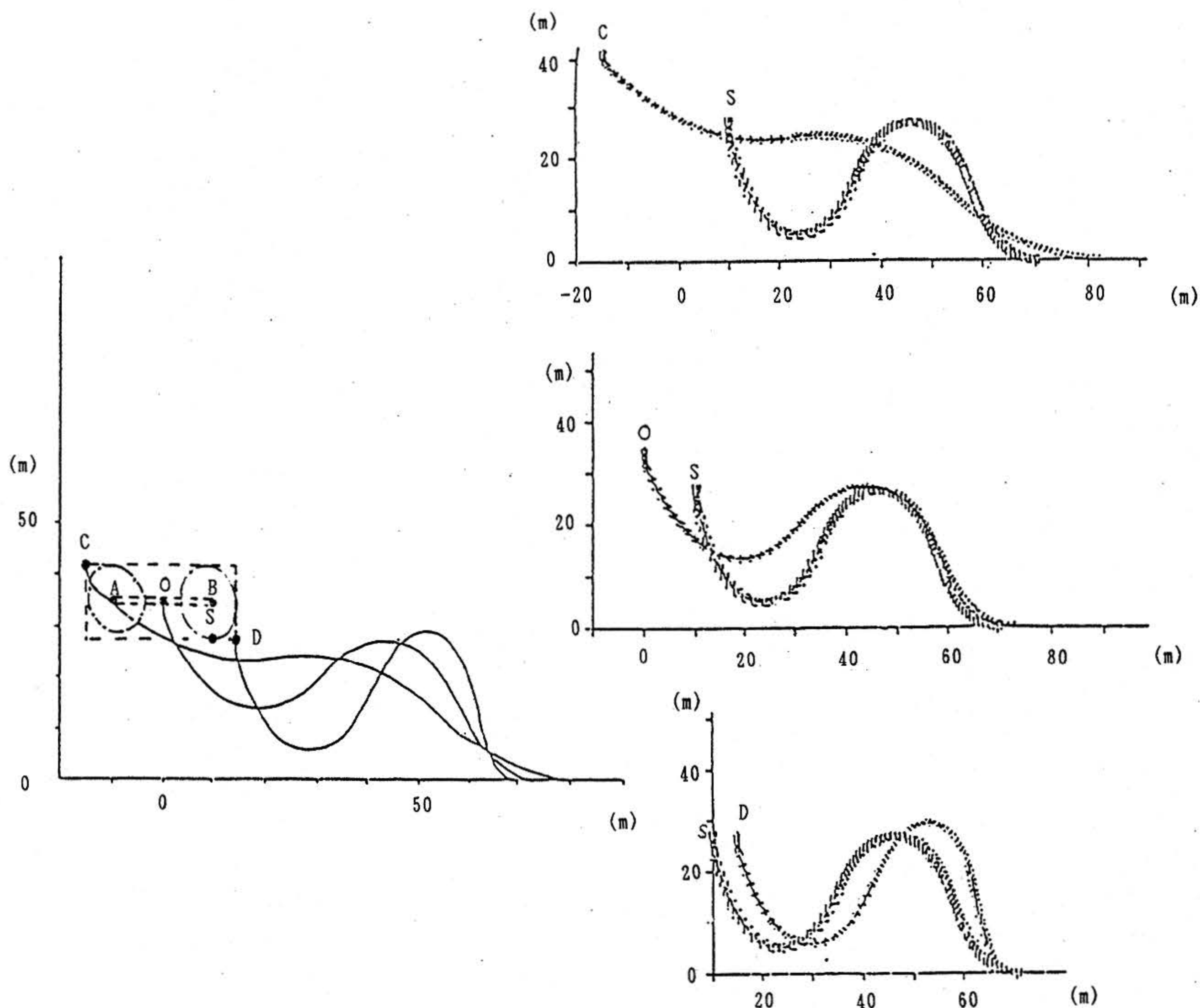


図 15 ライザー管形状の変化（2次元静的挙動解析）

Fig. 15 Static configuration of the flexible riser  
(2 dimensional static response analysis)

ライザー管形状及び作用荷重の変化を調べた。解析対象とした浮体の位置は、基準位置より浮体が最も遠くに移動した位置（遠方点）と最も近くに移動した位置（近接点）の2ケースとし、その位置においてライザー管上端が3.3に示した動的挙動をするものとして解析を実施した。解析結果を図16に示す。また、ライザー管形状の各要点の位置及び作用荷重を表6に示す。

この解析結果より、浮体の動揺に伴うライザー管の動的挙動は所定の条件を満足するものであることが確認できた。

## 5 海域実験

フレキシブルライザー管の敷設工事は、平成元

年7月に実施し、計測機器類の設置・調整の後、海域実験に伴うデータの計測・取得を開始した。現在実験を実施中である。

### 5.1 敷設工事

古河電気工業（株）千葉電線製作所で製作されたフレキシブルライザー管は、工場にて両側の端末金具と上端部のベンドスティフナーが取り付けられ、ドラムに巻いた状態で現地まで輸送された。現地では、敷設用の台船にドラムを固定するとともに、ライザー管繰り出し用の治具を取り付けた上で設置工事が開始された。敷設船よりライザー管を徐々にくり出しながら（写真1）、台船上にてライザー管に分散ブイ及びアンカーデバイスが順次取り付けられ（写真2）、浮体側ではライザー

表 5 浮体の静的移動時の解析結果 (2次元静的挙動解析)

Table 5 Result of 2-dimensional static analysis

| 項 目<br>Item                                       |                                | 遠方 C 点<br>Far point (C) | 基準点<br>ref. position | 近接 D 点<br>Close point (D) |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|
| 海底からの<br>高さ (m)<br>Height<br>from<br>sea bottom   | H1 (上端)<br>pipe top end        | 42.18                   | 34.68                | 27.18                     |
|                                                   | H2 (極小点)<br>btm of Lazy wave   | 23.41                   | 13.64                | 5.82                      |
|                                                   | H3 (極大点)<br>top of Lazy wave   | 24.19                   | 27.31                | 29.09                     |
| 作用荷重<br>(上端)<br>top end<br>load                   | 引張力 (k g)<br>tension           | 2,079.83                | 1,772.17             | 1683.86                   |
|                                                   | 曲げ (k g · m)<br>bending moment | 3,327.08                | 1,351.29             | 929.40                    |
| 作用荷重<br>(下端)<br>bottom end<br>load                | 引張力 (k g)<br>tension           | 1,196.41                | 333.97               | 98.46                     |
|                                                   | 曲げ (k g · m)<br>bending moment | 7.49                    | 26.40                | 70.70                     |
| 曲げ半径<br>(m)<br>bending<br>radius                  | 上端<br>pipe top end             | 2.25                    | 4.67                 | 6.51                      |
|                                                   | 極小点<br>btm of Lazy wave        | 32.95                   | 11.83                | 7.75                      |
|                                                   | 極大点<br>top of Lazy wave        | 33.38                   | 11.15                | 5.78                      |
|                                                   | 接地点<br>touch down point        | 32.56                   | 9.24                 | 3.45                      |
| 上端より<br>接地点まで<br>top end ~<br>touch down<br>point | 水平距離 (m)<br>horizontal dist.   | 97.21                   | 73.01                | 54.72                     |
|                                                   | パイプ長 (m)<br>pipe length        | 111.27                  | 102.12               | 98.46                     |

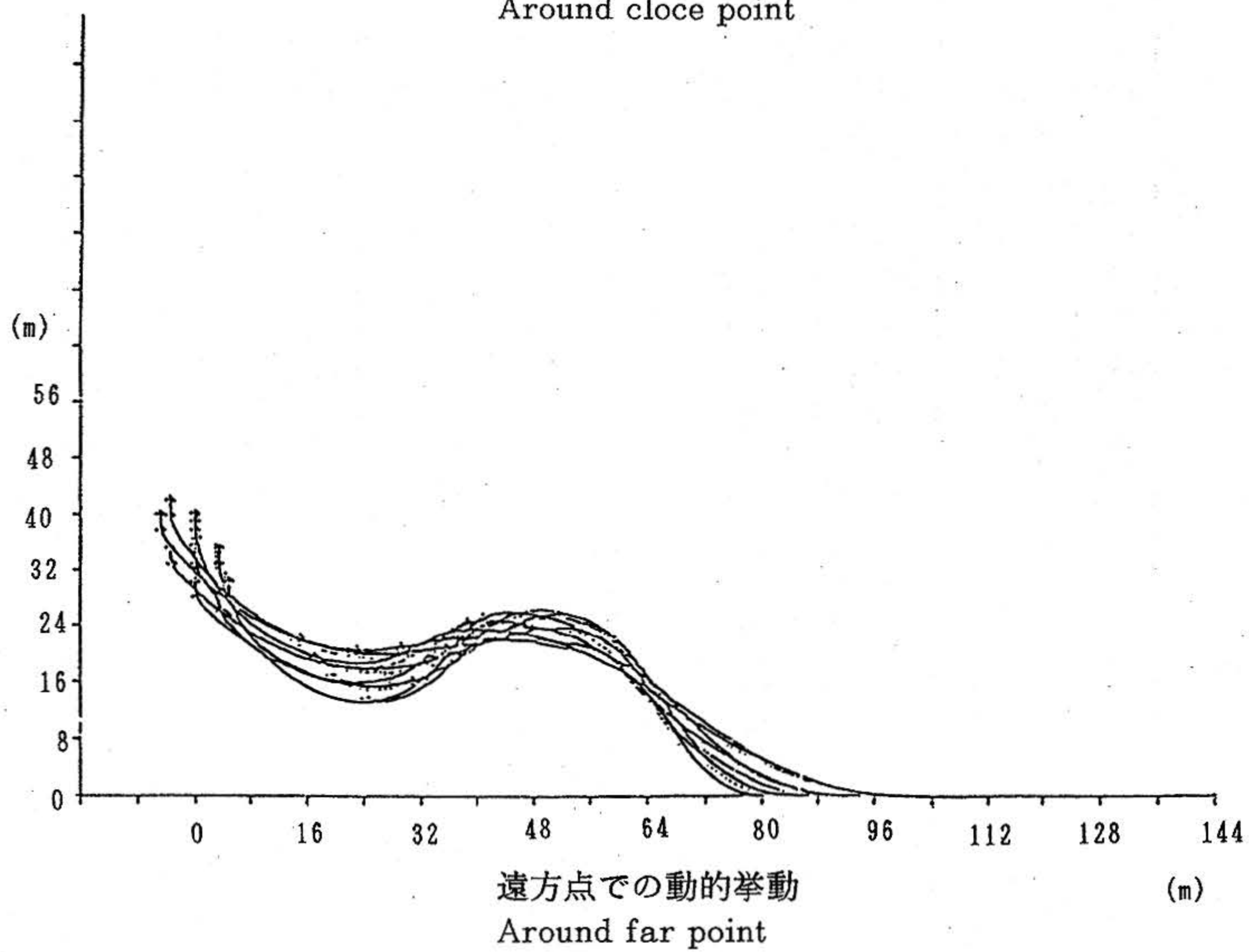
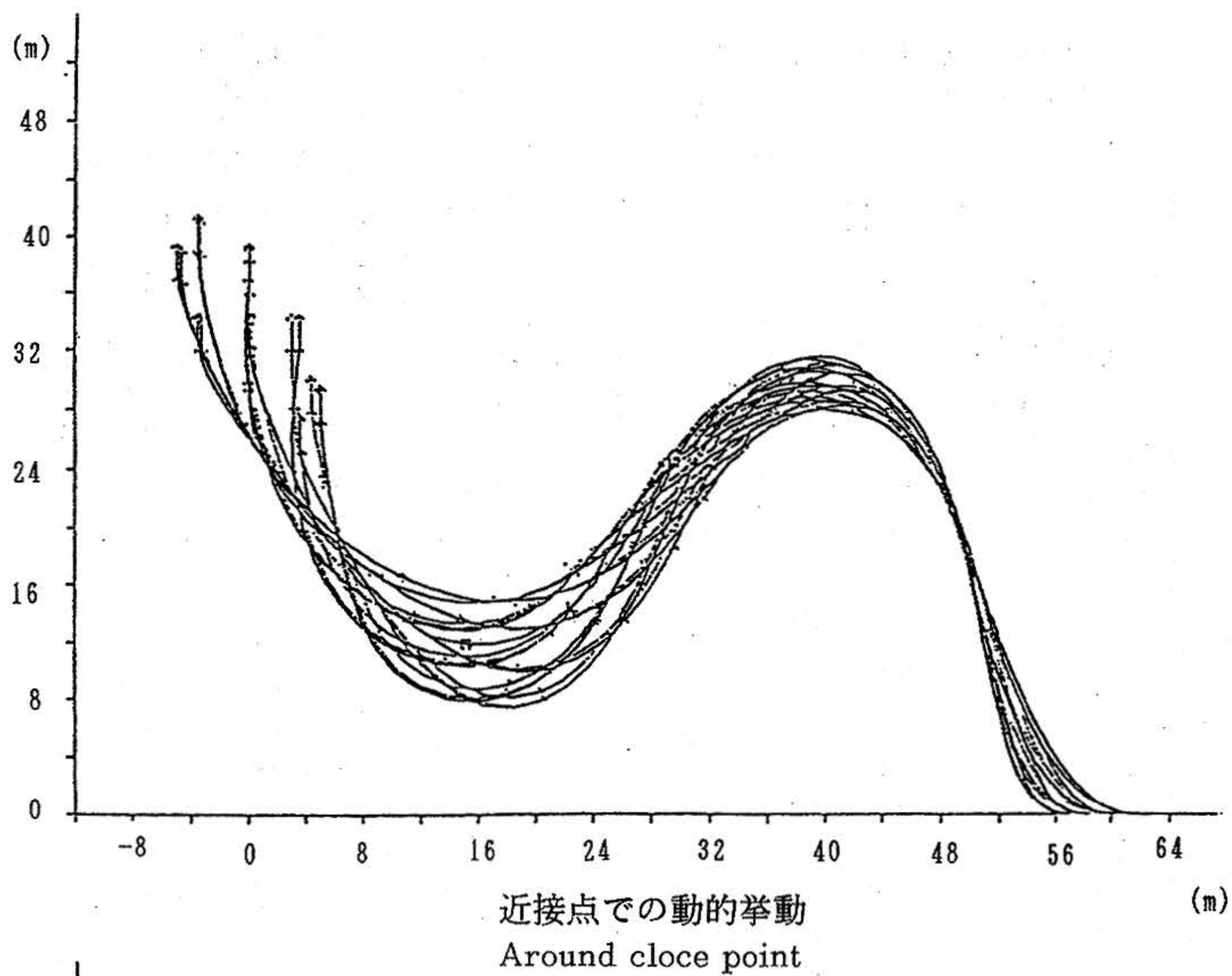


図 16 ライザー管形状の変化 (2次元動的挙動解析)  
Fig. 16 Dynamic change of the riser pipe configuration  
(2 dimensional dynamic response analysis)

表 6 浮体の動的移動時の解析結果 (2次元動的挙動解析)

Table 6 Result of 2-dimensional dynamic response analysis

| 項 目                                               |                                | 遠方 A 点<br>Far point (A) | 近接 B 点<br>Close point (B) |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 海底からの<br>高さ (m)<br>Height<br>from<br>sea bottom   | H1 (上端)<br>pipe top end        | max 42.18               | min 34.18                 |
|                                                   | H2 (極小点)<br>btm of Lazy wave   | max 20.56               | min 7.31                  |
|                                                   | H3 (極大点)<br>top of Lazy wave   | min 22.30               | max 30.41                 |
| 作用荷重<br>(上端)<br>top end<br>load                   | 引張力 (k g)<br>tension           | max 2,467.63            | max 2,180.74              |
|                                                   | 曲げ (k g · m)<br>bending moment | max 4,236.97            | max 2,716.33              |
| 作用荷重<br>(下端)<br>bottom end<br>load                | 引張力 (k g)<br>tension           | max 1,682.26            | max 195.53                |
|                                                   | 曲げ (k g · m)<br>bending moment | max 39.78               | max 42.92                 |
| 曲げ半径<br>(m)<br>bending<br>radius                  | 上端<br>pipe top end             | min 2.16                | min 3.61                  |
|                                                   | 極小点<br>btm of Lazy wave        | min 13.80               | min 6.00                  |
|                                                   | 極大点<br>top of Lazy wave        | min 10.54               | min 7.44                  |
|                                                   | 接地点<br>touch down point        | min 10.25               | min 2.91                  |
| 上端より<br>接地点まで<br>top end ~<br>touch down<br>point | 水平距離 (m)<br>horizontal dist.   | max 98.82               | max 56.70                 |
|                                                   | パイプ長 (m)<br>pipe length        | max 118.05              | max 97.47                 |

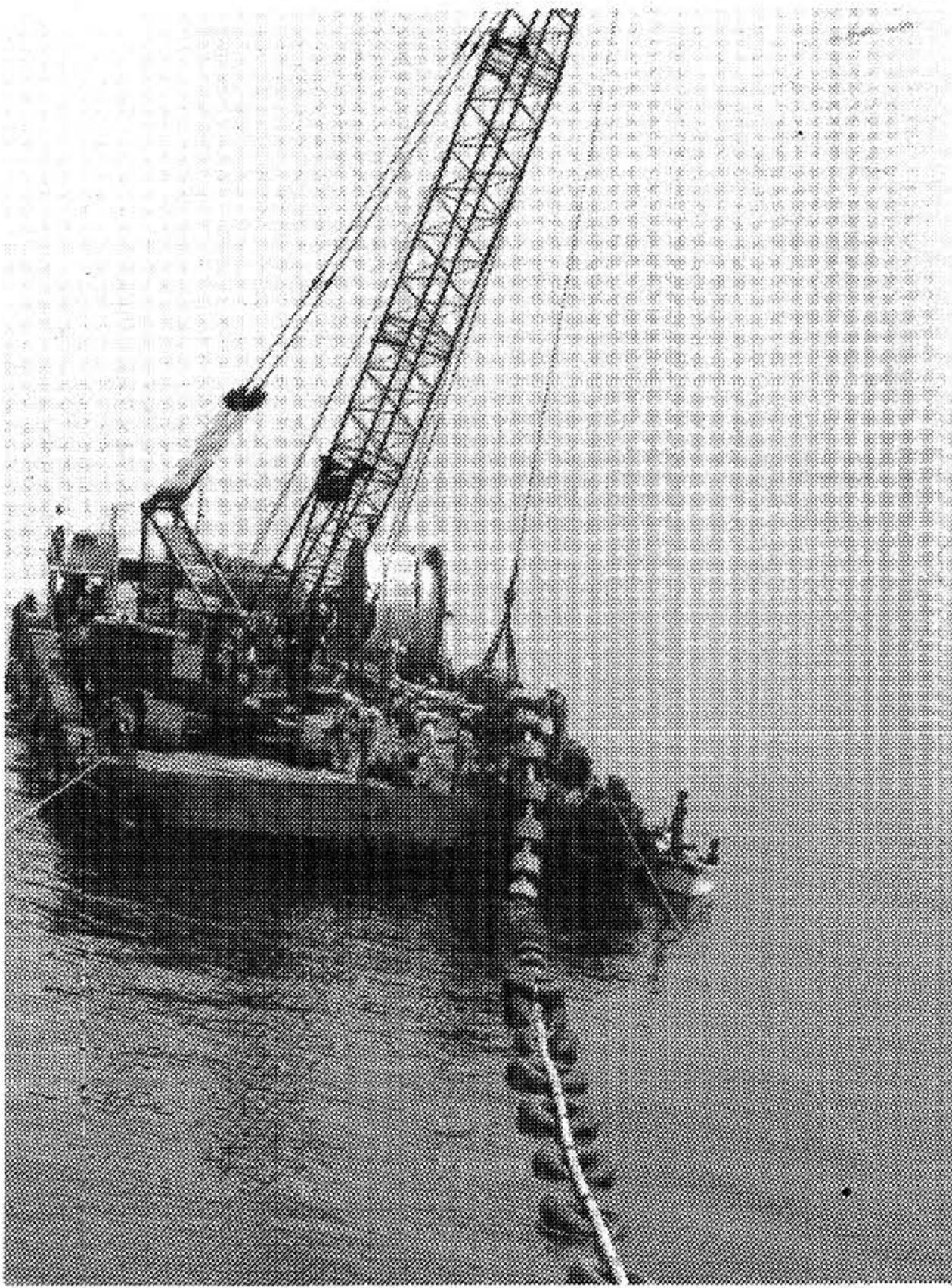


写真 2 ライザー管への分散ブイの取り付け  
Photo 2 Attaching the buoys to the riser pipe



写真 1 フレキシブルライザー管敷設作業  
Photo 1 Pipe lay work

管の端部を右舷後方のフーティングの下部に導いて、第1期海域実験の際に浮体に取り付け済みのライザー管接続用治具に取り付けた。

敷設工事に当たっては、ライザー管を設計形状にあわせて設置する必要がある。また、設置の時点で浮体の位置が基準位置とはずれた場所にある

と考えられたので、工事は下記の手順をふんですめられた。

(1) 基準位置に浮体がある場合に設計形状に従ってライザー管を敷設した時の海底側端末部のシンカー位置（シンカー設置目標位置）を計算にて求めた。

(2) 設置工事の時点で浮体位置と基準位置との相対位置関係を計測（光波測距儀使用）した。

(3) 設置工事の時点での浮体から見たシンカー設置目標位置の座標（浮体固定の座標系における値）を計算した。

(4) 第1期海域実験にて開発済みの超音波位置計測システム（RPS システム）を使用してシンカー設置点の位置出しを行った。つまり、シンカー設置目標位置の近傍に送波器を置き、その信号を浮体4隅に取り付けた受波器で受信して、浮体からの相対位置を検出した。この位置が(3)の目標位置と同等と判断されるまで送波器の位置を微修正することにより位置出しを行った（写真3）。

(5) ライザー管への分散ブイの取付を精度よく行うため、事前にパイプに取付位置をマークした。

(6) ライザー管敷設完了後、RPS システムによりライザー管の敷設形状と端末部シンカー位置を計測し、設計した形状に比較して問題なく良好であることを確認した（図17）。



写真 3 ライザー管下端部シンカーの位置決め作業

Photo 3 Positioning of the sinker at the bottom end of the riser pipe

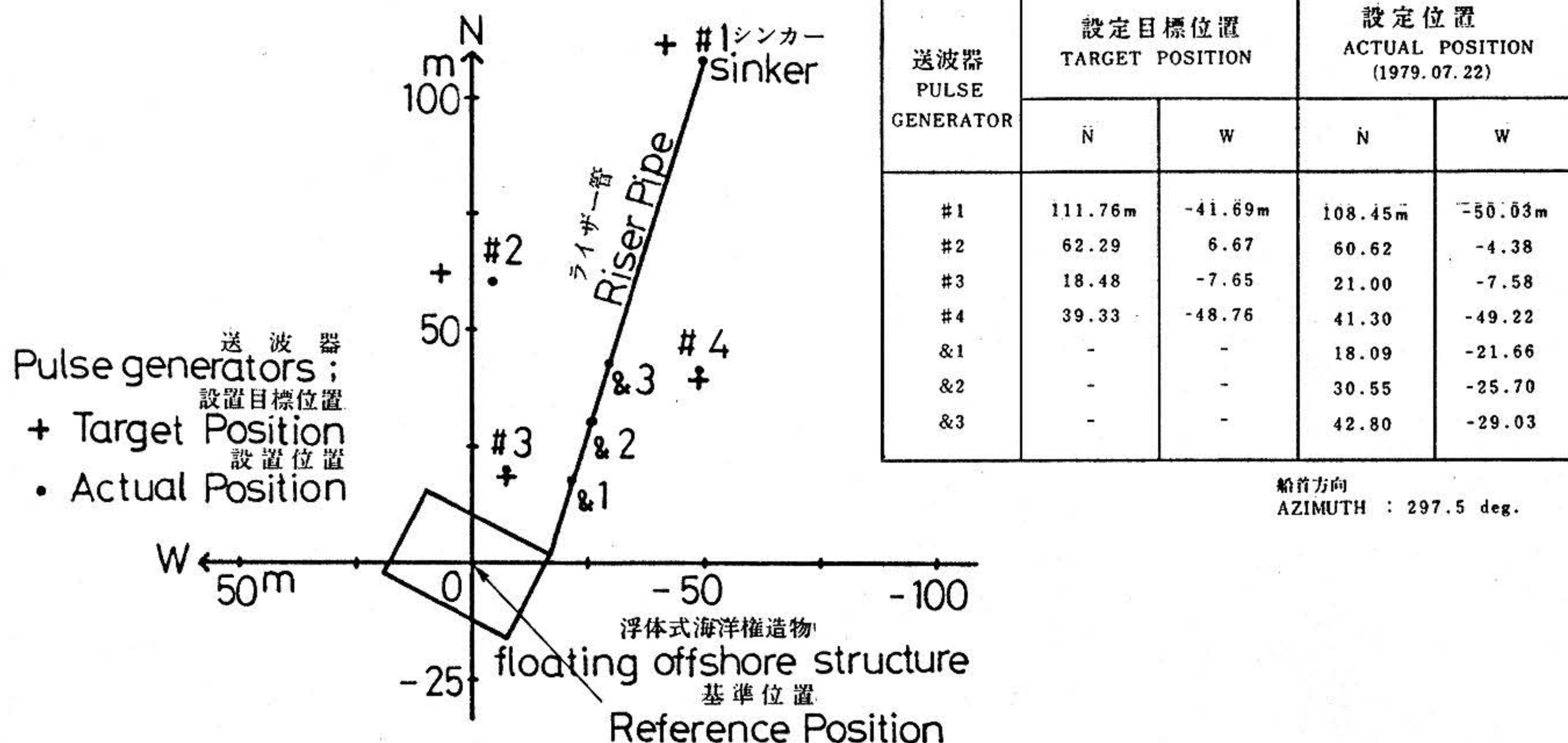


図 17 ライザー管及び送信器の設置位置

Fig. 17 Target and actual setting position of the riser pipe and pulse generators

## 5.2 計測システム

本海域実験では、海象、気象、浮体の挙動、ライザー管の海中挙動や張力、モーメント等の変動を計測している。

計測項目と計測に使用している計器を表7に示す。表中のライザー管位置検出システム（RPS）は、第1期海域実験にて開発したシステムである。海底及びライザー管の要所に取付けた送波器から発信される40KHzの超音波信号を浮体の4隅コラム下端に取り付けた4個の受波器で受信し、各送波器～受波器のスラントレンジから浮体の位置、姿勢、ライザー管の位置や挙動を求めるシステムであり、第1期海域実験にて計測精度を確認している。

浮体で得られたデータは、50GHzのマイクロ波を搬送波とする簡易無線装置（PASOLINK50）を使用したデータ伝送システムにより陸上へ送られ、データ収録されている。

## 6 おわりに

海洋科学技術センターは山形県鶴岡市由良において、運輸省船舶技術研究所との共同研究「浮体式海洋構造物による実海域実験」により海域実験

を実施しており、また昭和63年度からは、古河電気工業(株)との共同研究「フレキシブルライザー管挙動の解析・計測技術の研究開発」を実施している。平成元年度からはロイヤルダッチシェル社も加えた国際共同研究としてライザーシステムを再設計し、平成元年7月の敷設工事をへて現在海域実験を実施中である。

本稿では、フレキシブルライザーシステムの設計のための設計条件の検討とこれにもとづく設計の手法、ならびにライザーシステム敷設工事と海域実験の概要について報告した。本研究により下記の成果が得られた。

(1) 浮体の位置変化を光波測距儀で追跡調査することにより、計測期間（春季）の位置変化の特性として南西から北東へ向けての変化が多く、しかも荒天時にその移動量が大きくなることがわかった。なお、冬季については北西からの強い季節風により位置は北西から南東へ向けて変化すると予想している。

(2) 浮体式海洋構造物の波浪中での流体力を3次元特異点分布法により計算し、これを用いてライザー管上端接続部における動揺応答を明らかにした。

表 7 計測項目  
Table 7 Instrumentation

| 計測項目<br>Measuring item                                                                                                                                | 計 器<br>Equipments                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 気象・海象<br>weather & sea cond.<br>入射波<br>wave<br><br>風<br>wind<br>潮流<br>current<br>水温<br>water temperature<br>塩分<br>salinity<br>浮体運動<br>platform motion | ウェーブライダー<br>waverider<br>2次元波浪計 *<br>2-dimensional wave height meter<br>波浪観測ブイ **<br>wave measurement buoy<br>風向風速計 *<br>ultrasonic wind sensor<br>流向流速計<br>current meter<br>水温計<br>water temperature sensor<br>塩分濃度計<br>salinity sensor<br>傾斜計 (ピッチ, ロール)<br>clinometer (pitch, roll)<br>方位計 (ヨーイング)<br>gyro compass (yaw)<br>加速度計<br>acceleration sensor<br>超音波位置検出装置 (RPS)<br>Riser Positioning System |
| ライザー管<br>flexible riser pipe<br>張力, 曲げ<br>tension, bending mom.<br>内圧<br>inner pressure<br>挙動<br>motions                                              | ロードセル<br>loadcell<br>圧力計<br>pressure gauge<br>加速度計<br>acceleration sensor<br>超音波位置検出装置 (RPS)<br>Riser Positioning System<br>水中テレビロボット<br>underwater TV robot                                                                                                                                                                                                                                              |

- \* 船舶技術研究所  
Ship Research Institute  
 \*\* 気象庁  
Japan Meteorological Agency

(3) 上記の浮体の位置変化及び波浪中応答の特性をもとに本海域実験におけるライザー管敷設形状の設計条件を明かにすることができた。

(4) ライザー管敷設形状の設計手順及びライザー管の静的・動的挙動シミュレーション解析を含めて、その設計手法を明らかにできた。

(5) ライザー管の設計敷設形状にもとづく敷設工事の手順、手法を明かにするとともに設置後の形状確認により工事手法の有効性を立証することができた。

本海域実験では、現在、海象・気象、浮体動揺、ライザー管の海中挙動、張力・曲げモーメントの変動等を計測中であり、今後、計測データの解析を行って海域実験におけるライザーシステムの挙動特性を調査研究していく予定である。

最後に、本研究をすすめるに際して、運輸省船舶技術研究所海洋開発工学部の安藤定雄部長、大川豊氏には実験海域の風向風速データの提供等御協力をいただきました。

また、ライザー管の設計、シミュレーション解析、敷設工事及び海域実験に際しては、古河電気工業(株)千葉研究所の梅原満夫氏、同海洋工事部の山口卓見氏、橘直人氏の御協力を得ました。

これらの方々に心からお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 安藤定雄：浮体式海洋構造物による実海域実験(1)実海域実験の概要，昭和61年度秋季(第48回)船舶技術研究所研究発表会講演集，(1986)
- 2) Y. Makino, T. Okamoto, Y. Goto and M. Araki : The Problem of Permeation in Flexible Pipe, OTC 5745, (1988)
- 3) J.G.de Oliveira, Y. Goto and T. Okamoto: Theoretical and Methodological Approaches to Flexible Pipe Design and Application, OTC 5021, (1985)
- 4) C. Pettenati: Flexible Dynamic Risers, State of Art, Offshore, Feb. (1986)
- 5) 東京光学機械(株)：トプコンエレクトロニクス トータルステーション GUPPY GTS-3 取扱説明書
- 6) 海洋科学技術センター：海域利用計画調査，山形県沖海域調査報告(1979)
- 7) Y. Takaishi, S. Ando, Y. Ohkawa, K. Yamakawa and K. Yago : Design and Model Tests of the Proto-Type Floating Platform for At-sea Experiments, Fifth International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, Tokyo, (1986)
- 8) 工藤君明，岡本恒雄，木下篤：フレキシブルライザー管の海中挙動計測システムの研究開発，海洋科学技術センター試験研究報告，第22号，(1989)
- 9) 日本電気(株)：50GHz 帯簡易無線システム PASOLINK 50 技術資料，(1986) MTD-PASOLINK50
- 10) 工藤君明，本多牧生，安田哲也：浮体式海洋構造物海域実験における簡易データ伝送システムの開発，海洋科学技術センター試験研究報告，第21号，(1989)

(原稿受理：1989年11月27日)

付録 挙動解析の基本式

(1) 静的挙動解析の基本式

静的挙動解析の基本式を、次に示す。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial l} = SK + W \sin \theta \\ \frac{\partial \theta}{\partial l} = K \\ \frac{\partial x}{\partial l} = \cos \theta \\ \frac{\partial y}{\partial l} = \sin \theta \\ \frac{\partial S}{\partial l} = -TK + W \cos \theta + V \sin \theta \mid \sin \theta \mid \\ \frac{\partial}{\partial l} (EI \cdot K) = -S \end{array} \right.$$

$$\text{ただし, } V = \frac{1}{2} \rho D C_d v \mid v \mid$$

$T$  : ライザー張力  
 $S$  : ライザーせん断力  
 $x$  : ライザー  $x$  座標  
 $y$  : ライザー  $y$  座標  
 $\theta$  : ライザー角度  
 $K$  : ライザー曲率  
 $D$  : ライザー外径  
 $W$  : ライザー重量  
 $EI$  : ライザー曲げ剛性  
 $C_d$  : ライザー法線方向抗力係数  
 $\ell$  : ライザー長

$\rho$  : 外部流体密度

$v$  : 潮流速度

(2) 動的挙動解析の基本式

動的挙動解析の基本式を、次に示す。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial l} (T \cos \theta - S \sin \theta) = m \ddot{x} - q_x \\ \frac{\partial \theta}{\partial l} = K \\ \frac{\partial x}{\partial l} = \cos \theta \\ \frac{\partial y}{\partial l} = \sin \theta \\ \frac{\partial}{\partial l} (T \sin \theta + S \cos \theta) = m \ddot{y} - q_y \\ \frac{\partial}{\partial l} (EI \cdot K) = -S \end{array} \right.$$

$$\text{ただし, } m = \frac{W}{g} + \frac{\pi}{4} D^2 \rho$$

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_t \\ q_n \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} q_t \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_t \\ d_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_t \\ a_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_t \\ b_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_t \\ w_n \end{bmatrix}$$

$$\text{抗力 (潮流) 項} \quad \begin{bmatrix} d_t \\ d_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \pi D \rho C_f v_t \mid v_t \mid \\ \frac{1}{2} D \rho C_d v_n \mid v_n \mid \end{bmatrix}$$

$$\text{付加質量項} \quad \begin{bmatrix} a_t \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\pi}{4} D^2 \rho C_m \dot{v}_n \end{bmatrix}$$

$$\text{抗力 (波) 項} \quad \begin{bmatrix} b_t \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\pi}{4} D^2 \rho \dot{V}_{wn} \end{bmatrix}$$

$$\text{自重項} \quad \begin{bmatrix} w_t \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -W \sin \theta \\ -W \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_x + V_{wx} - \dot{x} \\ V_y + V_{wy} - \dot{y} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} v_t \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}$$

|                   |                |
|-------------------|----------------|
| $T$ : ライザー張力      | $D$ : ライザー外径   |
| $S$ : ライザーせん断力    | $m$ : ライザー質量   |
| $x$ : ライザー $x$ 座標 | $W$ : ライザー重量   |
| $y$ : ライザー $y$ 座標 | $EI$ : ライザー    |
| $\theta$ : ライザー角度 | 曲げ剛性           |
| $K$ : ライザー曲率      | $C_f$ : ライザー接線 |
| $\rho$ : 外部流体密度   | 方向抗力係数         |
| $V$ : 潮流速度        | $C_d$ : ライザー法線 |
| $V_w$ : 波速度       | 方向抗力係数         |
| $g$ : 重力加速度       | $l$ : ライザー長    |
|                   | $C_m$ : 付加質量係数 |

$x$  : 全体座標系での  $x$  方向  
 $y$  : 全体座標系での  $y$  方向  
 $t$  : 局所座標系での接線方向  
 $n$  : 局所座標系での法線方向